



Institut für Nachrichtentechnik (IfN)  
Technische Universität Braunschweig

## Jahresbericht 2019



Technische  
Universität  
Braunschweig



Institut für Nachrichtentechnik

Institut für Nachrichtentechnik (IfN)  
Technische Universität Braunschweig

Anschrift:                   Universitätsplatz 2  
                                  38092 Braunschweig

Institutsgebäude:       Haus der Nachrichtentechnik  
                                  Schleinitzstr. 22  
                                  38106 Braunschweig

Telefon:                   (0531) 391-2480

Telefax:                  (0531) 391-5192

Internet:                 <http://www.ifn.ing.tu-bs.de/>

Redaktion:               P. Beyer  
                              A. Gudat  
                              R. Görke

Fotos:                    Zhou Yu (Seite 13)  
                              6G Lab Oulu (Seite 117)  
                              Jianqiao Cheng (Seite 121)  
                              © Jacek Ruta/DFH-UFA (Seite 123)  
                              IRT (Seite 126)  
                              Emergency Exit Escape Room Warsaw  
                              (Seite 130)  
                              Alle übrigen: privat



Mitteilungen aus dem Institut für Nachrichtentechnik der  
Technischen Universität Braunschweig

Band 61

**Ulrich Reimers, Eduard Jorswieck,  
Thomas Kürner, Tim Fingscheidt (Hrsg.)**

**Jahresbericht 2019**

Shaker Verlag  
Düren 2019

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7104-7

ISSN 1865-2484

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Inhalt

	Seite
Personelle Besetzung des Instituts	6
Aus der Lehre	8
Exkursionen	11
Besondere Ereignisse	12
Kontakte zu Firmen und öffentlichen Institutionen	14
Kontakte zu Forschungseinrichtungen	19
Vorträge und Veröffentlichungen	25
Kolloquium Nachrichtentechnik	41
Master- und Bachelorarbeiten	42
Dissertationen	45
Aus der Forschung	46
– Abteilung für Elektronische Medien	46
– Abteilung für Informationstheorie und Kommunikationssysteme	57
– Abteilung Signalverarbeitung und Machine Learning	71
– Abteilung Mobilfunksysteme	89
Personelle Veränderungen	106
Jubiläen und persönliche Ereignisse	113
Alumni-Nachrichten	113
Neue DFG-Forschungsgruppe „Metrology for THz Communications“	115
Best Paper Award für Prof. Eduard Jorswieck und Dr. Pin-Hsun Lin bei der ISWCS 2019	117
Best Paper Award für Jan-Aike Bolte und Prof. Fingscheidt	119
Neal Shepherd Award für Dr. Ke Guan, Dr. Bile Peng und Prof. Thomas Kürner	121
Johannes Eckhardt erhält Preise der Deutsch-Französischen Hochschule und der TU Dresden	123
IEEE WASPAA Travel Award für Ziyue Zhao	125
5G TODAY	126
TUBS.dll – Das Deep Learning Lab und seine zweite Challenge	128
Internship von Ziyue Zhao bei den BabbleLabs	130
Assistenten-Exkursion 2019	131
Behörden-Staffelmarathon	134
IfN-Institutsausflug am 15. August 2019	135
TU Night – Der Besuch des LehrLEOs	137
In dieser Reihe sind bisher erschienen:	138



Liebe Freundinnen und Freunde des IfN,

„Informationstheorie und Kommunikationssysteme“: Sagt Ihnen der Name etwas? Vermutlich nicht, dabei steht er für DIE große IfN-Innovation des Jahres 2019. So heißt nämlich die vierte Abteilung des Instituts, die am 1. August gegründet wurde. Geleitet wird sie von Prof. Dr.-Ing. Eduard Jorswieck, der im kommenden Jahr mein Nachfolger werden wird. Seit dem 1. August ist Herr Jorswieck Professor mit der Denomination „Nachrichtensysteme“ an der Technischen Universität Braunschweig. In einem eigenen Beitrag wird er sich ab Seite 104 ausführlich vorstellen. Herr Jorswieck hat vier Wissenschaftliche Mitarbeiter von seiner bisherigen Universität, der Technischen Universität Dresden, mitgebracht – und die entsprechende Zahl an von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungsprojekten. Bis zum 31. März 2020 wird unser neuer Kollege per angesparter sogenannter Drittmittel des IfN finanziert und wird dann meine Professoren-Planstelle übernehmen. Wir, gerade auch ich persönlich, freuen uns über diese wunderbare Lösung mit einem großartigen Kollegen. Tja, und in der Tradition des IfN wurde Herr Jorswieck zusammen mit seinem Mitarbeiter Dr. Lin auch gleich mit dem Best Paper Award des 16. International Symposium on Wireless Communication Systems ausgezeichnet. „Tradition des IfN“? Tatsächlich können wir uns in jedem Jahr über Auszeichnungen freuen. Im Berichtsjahr sind es außer dem genannten Best Paper Award ein Exzellenzpreis der Deutsch-Französischen Hochschule für unseren Mitarbeiter Dipl.-Ing. Johannes Eckhardt, ein Best Paper Award für Herrn Jan-Aike Bolte, M.Sc., und Prof. Fingscheidt sowie der Neal Shepherd Award der IEEE Vehicular Technology Society für Prof. Thomas Kürner und unsere ehemaligen Mitarbeiter Dr. Bile Peng und Dr. Ke Guan. Nun sind im Institut also vier Professoren aktiv und das ist doch wohl ein Foto wert:



**Das „Professoren-Team“ des IfN**  
(v.l.n.r.: Prof. Fingscheidt, Prof. Jorswieck,  
Prof. Kürner, Prof. Reimers)



So, nun aber zu unseren Arbeiten des Jahres 2019:

In der Abteilung „Signalverarbeitung und Machine Learning“ wächst derzeit eine Gruppe „Computer Vision“ heran, die sich maßgeblich mit der Umfeld-Wahrnehmung im Kontext des autonomen Fahrens befasst. Herrn Bolte und Prof. Fingscheidt wurden, wie bereits erwähnt, für eine grundlegende Arbeit zum sogenannten Domain Transfer auf dem Safe Artificial Intelligence for Automated Driving (SAIAD) Workshop, der im Rahmen der Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) in Long Beach, USA, im Juni 2019 stattfand, der Best Paper Award verliehen. Die Bundesministerien für Bildung und Forschung (BMBF) sowie Wirtschaft und Energie (BMWi) haben auf Anregung der VDA-Leitinitiative „Autonomes und vernetztes Fahren“ zwei große Verbundprojekte gestartet, an denen Prof. Fingscheidt mit der Computer-Vision-Gruppe beteiligt ist. Zwei weitere große Verbundvorhaben dieser sog. KI-Projektfamilie sind unter Beteiligung des IfN in Vorbereitung.

Zu den besonders renommierten sogenannten „Koordinierten Programmen“ der DFG gehören Forschungsgruppen. 2019 konnten wir uns über die Entscheidung für die Forschungsgruppe Meteracom (Metrologie für die THz-Kommunikation) freuen. Prof. Kürner, die Mitarbeiter der Abteilung „Mobilfunksysteme“ und zahlreiche Kolleg/innen aus der TU Braunschweig, aber auch von anderen Hochschulen, werden in Meteracom einen weiteren Aspekt des im IfN durch Prof. Kürner seit vielen Jahren höchst erfolgreich vertretenen Forschungsgebiets „Tera-Hertz“ adressieren. Wenn man Herrn Kürner im Berichtsjahr suchte und im Institut nicht fand, war er im Zweifel im Ausland bei einer Tagung als Keynote Speaker aktiv. THz-Kommunikation ohne ihn, das geht nämlich gar nicht.

In der Abteilung „Elektronische Medien“ stellte „5G Broadcast“ auch im Berichtsjahr den Schwerpunkt der Arbeiten dar. Das System traf auf vielfältiges internationales Interesse und so sind beispielsweise die IfN-Messem Empfänger nicht mehr nur in Deutschland, Frankreich und Italien im Rahmen von Feldversuchen im Einsatz, sondern nun haben auch die Volksrepublik China und Brasilien solche Geräte erworben. Es bleibt da nicht aus, dass „Systempflege“ einige Kapazität bindet. Parallel dazu erforschen wir, wie ein System, das die zellularen Netze des Mobilfunks mit einem sogenannten „Overlay“ überdeckt, auch unter Verwendung des mittlerweile standardisierten „5G New Radio“ realisiert werden kann. Selbstverständlich soll eine funktionsfähige Lösung auf Basis des „IfN Generic Software Defined Radio Toolkit“ entstehen.

Sollten Sie in der nächsten Zeit das Institutsgebäude betreten, werden Sie vermutlich auf Handwerker treffen. Die seit einigen Jahren gemeinsam vom Institut für Hochfrequenztechnik und dem IfN betriebene Mechanische Werkstatt steckt mitten im Umbruch. Wände werden versetzt, Maschinen verschrottet, neue Arbeitsplätze für Auszubildende geschaffen etc. etc. Besonders problema-

tisch war die Demontage von Drehbänken, die seit dem Erstbezug des Gebäudes, im Kellerboden verankert, ihren Platz verteidigten. Der Kellerboden aber enthält gebundene Asbestfasern und so lebten wir während der Demontage-Phase zeitweilig mit Einhausungen, die zur Asbest-Entsorgung unverzichtbar waren.

Lassen Sie mich nun noch in meiner Funktion als Vizepräsident auf ein Thema zurückkommen, das ich im Jahresbericht 2018 angesprochen hatte: den Antrag der Technischen Universität Braunschweig, als Exzellenzuniversität anerkannt zu werden. Der 2. und 3. Mai waren für mich, die Mitglieder des Präsidiums und sicherlich auch eine Vielzahl der Kolleginnen und Kollegen der Universität der dienstliche Höhepunkt des Jahres. Ein Team von internationalen Gutachtern besuchte die TU, um im Rahmen eines zweitägigen, auf die Minute genau geplanten, Programmes die Vor-Ort-Evaluation zu absolvieren. Die Universität schlug sich phantastisch und die Gutachter würdigten später ausdrücklich den Enthusiasmus und das Engagement der gesamten Universität. Tja, am 19. Juli erfuhren wir dann aber, dass der Einsatz nicht zum Ziel geführt hatte. Exzellenzuniversität sind wir nicht geworden. Vielleicht überrascht es Sie, dass die Universität nicht in eine Depression verfiel. Die Vorbereitung der Antragstellung und der Vor-Ort-Begehung hatten uns so sehr voran gebracht, dass sich der Prozess als solcher für die Universität hundertprozentig gelohnt hat. Und: Am 12. September erfuhren wir, dass wir mit unserem Antrag im „1000-Professor/innen-Programm“ des Bundes einen 100%igen Erfolg errungen haben. Die Universität wird alle 18 beantragten neuen Professuren einrichten können. Großer Jubel!

Gestatten Sie mir zum Abschluss noch eine persönliche Bemerkung. Dies ist der letzte „Leitartikel“ eines IfN-Jahresberichtes aus meiner Feder. 27 derartige Beiträge sind es seit 1993 geworden und nun freue ich mich, dass Prof. Jorswieck den Jahresbericht 2020 einleiten wird. Es ist zu früh für Abschiedsworte, aber ich möchte Ihnen, den Leserinnen und Lesern unseres Jahresberichtes für Ihr (zum Teil langjähriges) Interesse herzlich danken. Danken möchte ich, im Namen des gesamten Instituts, auch unseren zahlreichen Kooperationspartnern im In- und Ausland für die vielfältige erfolgreiche Zusammenarbeit.

Im Namen des Institutsvorstands

U. Reimers

## Personelle Besetzung des Instituts (Stand 30.11.2019)

Vorstand	Prof. Dr.-Ing. Ulrich Reimers (Geschäftsführender Leiter) Prof. Dr.-Ing. Eduard Jorswieck Prof. Dr.-Ing. Thomas Kürner Prof. Dr.-Ing. Tim Fingscheidt
----------	---

Entpflichtete Prof.	Prof. Dr.-Ing. Erwin Paulus
---------------------	-----------------------------

Honorarprofessoren	Prof. Dr.-Ing. Alfred Schmitz Prof. Dr.-Ing. Rainer Heiß
--------------------	---

### Wissenschaftliche Mitarbeiter

Landesmittel	Andreas Bär, M.Sc.
--------------	--------------------

Jan-Aike Bolte, M.Sc.

Nils Dreyer, M.Sc.

Mark Hoyer, M.Sc.

Florian Jackisch, M.Sc.

Jonas Löhdefink, M.Sc.

Tianxiang Nan, M.Sc.

Lucca Richter, M.Sc.

Fabian Schrieber, M.Sc.

Michael Schweins, M.Sc.

Drittmittel	Jan Baumann, M.Sc.
-------------	--------------------

Jonas von Beöczy, M.Sc.

Dipl.-Ing. Karl-Ludwig Besser

Jasmin Breitenstein, M.Sc.

Tobias Doeker, M.Sc.

Dipl.-Ing. Johannes Marvin Eckhardt, Ingénieur Centralien

Samy Elshamy, M.Sc. (Oberingenieur)

Jan Franzen, M.Sc.

Christoph Herold, M.Sc.

Ratna Indrawijaya, M.Sc.

Dipl.-Ing. Carsten Janda

Bo Kum Jung, M.Sc.

Marvin Klingner, M.Sc.

Dr. Pin-Hsun Lin

	<p>Timo Lohrenz, M.Sc.          Andrew Lonnstrom, M.Sc.          Patrick Meyer, M.Sc.          Sepehr Rezvani, M.Sc.          Dipl.-Ing. Peter Schlegel          Maximilian Strake, M.Sc.          Lennart Thielecke, M.Sc.          Ziyi Xu, M.Sc.          Ziyue Zhao, M.Eng.</p>
Gastwissenschaftler	<p>Dr. Enrico Vitucci (25.03. bis 28.03.2019)          Università di Bologna,          Bologna, Italien</p> <p>Vitaly Petrov, M.Sc. (13.05. bis 07.06.2019)          Universität Tampere,          Tampere, Finnland</p> <p>Jiaying Liu, B.Sc. (18.11.2019 bis 18.11.2020)          Institute of Optics and Electronics,          University of Chinese Academy of Sciences,          Chengdu, China</p>
Technischer Angestellter	Andreas Gudat
Sekretariat	<p>Nina Andersen          Ronja Haase          Jutta Nottbohm (Tätigkeit für Vizepräsident)</p>
Bibliothek	Rudolf Görke
Elektrotechnische Assistentinnen	<p>Petra Beyer          Boguslaw Brandt          Eike-Asslo Erichsen-Rua          Simone Sengpiel</p>
Feinmechanische Werkstatt	<p>Uwe Hellrung (Feinmechaniker-Meister,          Werkstattleiter)          Jan Eisenberger (in Ausbildung)</p>

## Aus der Lehre

Hier soll ein kurzer Überblick über die am Institut laufenden Lehrveranstaltungen gegeben werden. Ausführlichere Informationen sind auf unserer Homepage im Internet unter <http://www.ifn.ing.tu-bs.de/> zu finden.

### Vorlesungen (SS 2019, WS 2019/20):

#### Prof. Dr.-Ing. Ulrich Reimers

Grundlagen der Informationstechnik	(WS) 2V
Signalübertragung	(SS) 4V, 2Ü
Rechnerübung zur Signalübertragung	(SS) 2Ü
Bildkommunikation I	(WS) 2V
Bildkommunikation II	(SS) 2V
Aktuelle Systeme für die Elektronischen Medien	(WS) 2V

#### Prof. Dr.-Ing. Eduard Jorswieck

Netzwerkinformationstheorie	(WS) 2V, 2Ü
-----------------------------	-------------

#### Prof. Dr.-Ing. Thomas Kürner

Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik	(WS) 2V, 2Ü
Codierungstheorie	(SS) 2V, 1Ü
Rechnerübung zur Codierungstheorie	(SS) 1Ü
Grundlagen des Mobilfunks	(WS) 2,5V, 1,5Ü
Planung terrestrischer Funknetze	(SS) 2V
Rechnerübung zur Planung terrestrischer Funknetze	(SS) 2Ü
Modellierung und Simulation von Mobilfunksystemen	(SS) 2V
Rechnerübung zur Modellierung und Simulation von Mobilfunksystemen	(SS) 2Ü
Advanced Topics in Mobile Radio Systems	(WS) 2V, 1Ü
Self-Organizing Networks	(SS) 2V, 1Ü
Labor Mobilfunksysteme	(SS) 3Ü

**Prof. Dr.-Ing. Tim Fingscheidt**

Mustererkennung	(WS)	2V, 2S
Deep Learning Lab	(SS)	4Ü
Digitale Signalverarbeitung	(SS/WS)	2V, 1Ü
Rechnerübung zur digitalen Signalverarbeitung	(SS/WS)	2Ü
Sprachkommunikation	(WS)	2V
Rechnerübung Sprachkommunikation	(WS)	2Ü
Einführung in die Elektrotechnik für Medienwissenschaftler	(SS)	2V, 1Ü
Elektrotechnische Grundlagen der Technischen Informatik	(SS)	2V, 1Ü
Sprachdialogsysteme (Spoken Language Processing)	(SS)	2V, 2S
Oberseminar „Machine Learning“	(SS)	2V

**Lehraufträge an der TU Braunschweig:****Prof. Dr.-Ing. Rainer Heiß**

Steuerung von Forschungs- und Entwicklungsprozessen	(WS)	2V
---	------	----

**Dr.-Ing. habil. Thomas Kleine-Ostmann**

Hochfrequenz- und Mobilfunkmesstechnik	(WS)	2V, 2Ü
--	------	--------

**Prof. Dr.-Ing. Alfred Schmitz**

Elektroakustik	(WS)	2V
----------------	------	----

Zur Betreuung der Vorlesungen und der zugehörigen Prüfungen bzw. für die Vorlesungsversuche standen folgende Wissenschaftliche Mitarbeiter zur Verfügung:

Grundlagen der Informationstechnik	Schrieber
Signalübertragung	Jackisch, Richter
Bildkommunikation I	Schlegel
Bildkommunikation II	Schlegel
Aktuelle Systeme für die Elektronischen Medien	Hoyer
Netzwerkinformationstheorie	Janda, Lin
Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik	Thielecke
Codierungstheorie	Schweins
Grundlagen des Mobilfunks	Dreyer, Eckhardt
Planung terrestrischer Funknetze	Nan
Modellierung und Simulation von Mobilfunksystemen	Eckhardt

Advanced Topics in Mobile Radio Systems	Indrawijaya
Self-Organizing Networks	Nan
Mustererkennung	Strake
Deep Learning Lab	Elshamy
Digitale Signalverarbeitung	Bolte, Franzen
Sprachkommunikation	Franzen
Einführung in die Elektrotechnik für Medienwissenschaftler	Löhdefink
Elektrotechnische Grundlagen der Technischen Informatik	Löhdefink
Sprachdialogsysteme (Spoken Language Processing)	Lohrenz
Oberseminar „Machine Learning“	Bolte
Steuerung von Forschungs- und Entwicklungsprozessen	Schrieber
Hochfrequenz- und Mobilfunkmesstechnik	Doeker
Elektroakustik	von Beöczy

Die Übungen und Seminare sowie das Labor wurden von folgenden Wissenschaftlichen Mitarbeitern durchgeführt:

Signalübertragung	Jackisch, Richter
Rechnerübung zur Signalübertragung	Richter
Netzwerkinformationstheorie	Janda, Lin
Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik	Thielecke
Codierungstheorie	Schweins
Rechnerübung zur Codierungstheorie	Schweins
Grundlagen des Mobilfunks	Dreyer, Eckhardt
Rechnerübung zur Planung terrestrischer Funknetze	Nan
Rechnerübung zur Modellierung und Simulation von Mobilfunksystemen	Eckhardt
Advanced Topics in Mobile Radio Systems	Indrawijaya
Self-Organizing Networks	Nan
Labor Mobilfunksysteme	Dreyer
Mustererkennung	Strake
Digitale Signalverarbeitung	Bolte
Rechnerübung zur digitalen Signalverarbeitung	Franzen
Rechnerübung Sprachkommunikation	Franzen
Einführung in die Elektrotechnik für Medienwissenschaftler	Löhdefink
Elektrotechnische Grundlagen der Technischen Informatik	Löhdefink
Sprachdialogsysteme (Spoken Language Processing)	Lohrenz
Hochfrequenz- und Mobilfunkmesstechnik	Doeker

### **Studienseminar Nachrichtentechnik:**

Prof. Fingscheidt, Prof. Jorswieck, Prof. Kürner und Prof. Reimers unter Mitwirkung von Herrn Löhdefink

### **Auflagenkurs Medientechnik und Kommunikation:**

Prof. Fingscheidt, Prof. Kürner, Prof. Reimers, Prof. Ernst, Prof. Johns und Prof. Wolf unter Mitwirkung von Herrn Schrieber

### **Nachrichtentechnische Praktika:**

Praktikum für Nachrichtentechnik (Herr Schlegel) (WS) 4Ü

### **Kolloquium Nachrichtentechnik:**

Prof. Fingscheidt, Prof. Jorswieck, Prof. Kürner, Prof. Reimers

### **Ringvorlesung Elektrotechnik und Informationstechnik:**

Die Hochschullehrer der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik (SS) 2V

## **Elektroakustik-Exkursion**

Die jährliche Exkursion zur Vorlesung Elektroakustik fand dieses Jahr am 30. Januar statt. Zwölf Studierende aus drei verschiedenen Studiengängen sowie Professor Alfred Schmitz, Lucca Richter und Jonas von Beöczy besuchten die Firma Sennheiser in der Wedemark bei Hannover und anschließend die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig. Bei der Firma Sennheiser gab es zunächst einen ausführlichen Einblick in die Firmengeschichte sowie die heutige Firmenstruktur und -philosophie. Danach wurden die automatischen und manuellen Produktionsanlagen besichtigt. Abschließend konnten die Studierenden einen Prototyp des teuersten Kopfhörers der Welt Probe hören und mit aktuellen Spitzenmodellen der Firma Sennheiser vergleichen. In den akustischen Prüfräumen des Fachbereichs für angewandte Akustik der PTB wurden anschließend Experimente zur Messung akustischer Kenngrößen durchgeführt und erläutert. Die in der Vorlesung dargelegten Inhalte konnten durch die Exkursion für die Studierenden in einen praktischen Zusammenhang gesetzt werden.

Jonas von Beöczy



## Besondere Ereignisse

- Am 24. Januar 2019 wurde unser Wissenschaftlicher Mitarbeiter Johannes M. Eckhardt, Absolvent der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der TU Dresden, als einer von elf Preisträgern durch die Deutsch-Französische Hochschule (DFH) mit einem Exzellenzpreis in der Französischen Botschaft in Berlin geehrt. Eine Woche später erhielt Herr Eckhardt zudem den Georg-Helm-Preis der TU Dresden für seine Diplomarbeit mit dem Thema „Entwurf eines MIMO-Primärradarsystems“ (s. Seite 123).
- Herr Bolte und Prof. Fingscheidt erhielten im Juni 2019 für ihr gemeinsam mit Kolleginnen und Kollegen von Volkswagen verfasstes Paper zur unüberwachten Domänenadaptation den Best Paper Award auf dem IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)-Workshop „Safe Artificial Intelligence for Automated Driving“ in Long Beach, USA. Siehe auch der Sonderbericht auf Seite 119.
- Prof. Kürner hielt Vorlesungen im Rahmen des Kurses „Mobile Propagation for 5G and Beyond“ der European School of Antennas, der vom 10. bis 14. Juni 2019 in Cesenatico/Italien sowie in der Villa Griffone in der Nähe von Bologna stattfand.
- Am 12. Juli 2019 fand die Abschlussveranstaltung der nunmehr zweiten Auflage des TU Braunschweig Deep Learning Labs (TUBS.dll) statt. Dank industrieller Sponsoren erhielten diesmal die besten drei Teams ein Preisgeld. Auch ist es erstmals gelungen, sowohl die zu lösende Aufgabe, wie auch die dazugehörenden Daten aus der Industrie zu bekommen: ein erklärtes Ziel des BMBF-Förderprojekts. Ein Sonderbericht findet sich auf Seite 128.
- Gemeinsam mit seinem Wissenschaftlichen Mitarbeiter Dr. Pin-Hsun Lin wurde Prof. Eduard Jorswieck im Rahmen des 16. International Symposium on Wireless Communication Systems im finnischen Oulu der Best Paper Award zuerkannt. Die ausgezeichnete Arbeit beschäftigt sich mit den fundamentalen Grenzen der ultra-zuverlässigen drahtlosen Kommunikation (engl. ultra-reliable low latency communication, URLLC). Mehr Information findet sich auf Seite 117.
- Im Rahmen der IEEE Vehicular Technology Society (VTS) Conference in Honolulu/USA wurden am 24. September 2019 Dr. Ke Guan, Dr. Bile Peng und Prof. Kürner zusammen mit weiteren Koautoren der Beijing Jiaotong Universität mit dem Neal Shepherd Award der IEEE Vehicular Technology Society ausgezeichnet (s. Sonderbericht auf Seite 121).
- Am 20. September 2019 fand an der Waseda Universität in Tokio der erste internationale Workshop des von Prof. Kürner auf europäischer Seite koordinierten EU-Japan-Projekts ThoR (Terahertz end-to-end wireless systems support

ting ultra-high data Rate applications) statt. Insgesamt ca. 80 Teilnehmer/innen wohnten der Veranstaltung bei.



**Teilnehmer/innen des 1. internationalen ThoR-Workshops in Tokio  
(Foto: Zhou Yu)**

## **Kontakte zu Firmen und öffentlichen Institutionen**

### **ACST GmbH, Hanau**

EU-Projekt TERAPOD

### **AID - Autonomous Intelligent Driving GmbH, München**

BMWi-Projekt KI-Absicherung

### **Audi AG, Ingolstadt**

BMWi-Projekt KI-Absicherung

### **Auerswald GmbH & Co. KG, Cremlingen**

Forschungsvorhaben Sprachverarbeitung

### **Barkhausen Institut gGmbH, Dresden**

Forschungsvorhaben Sicherheit auf der Übertragungsschicht

### **Bay Photonics, Brixham, Großbritannien**

EU-Projekt TERAPOD

### **Bayerischer Rundfunk (BR), München**

5G Media Initiative

### **BISDN GmbH, Berlin**

BMBF-Projekt Vorhaben SupraCoNeX

### **BMW AG, München**

BMWi-Projekt KI-Absicherung

### **Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach**

BMBF-Projekt KI-Plattformkonzept

### **Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin und Bonn**

Funkregulierung über 275 GHz auf der Weltfunkkonferenz 2019

### **Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, Bonn, Leipzig und Mainz**

Funkregulierung über 275 GHz auf der Weltfunkkonferenz 2019

### **Cologne Broadcasting Center, Köln**

Kooperationsvertrag Digitale Übertragungstechnik

**Continental Automotive AG, Hannover**

BMW-Projekt KI-Absicherung

**Dell EMC, Cork, Irland**

EU-Projekt TERAPOD

**Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH (DFKI), Kaiserslautern**

BMW-Projekt KI-Absicherung

**Deutsche Funkturm GmbH, Münster**

Forschungsprojekt Bahnversorgung

**Deutsche Telekom AG, Darmstadt, Bonn und Prag**

Projekt Drohnen in Mobilfunknetzen

EU-Japan-Projekt ThoR

**DeveriTec GmbH, Dresden**

Forschungsvorhaben Sicherheit auf der Übertragungsschicht

**Ericsson AB, Linköping, Schweden**

EU-Projekt 5GWireless

**European Broadcasting Union (EBU), Genf, Schweiz**

Projektbüro des DVB-Projektes

5G Media Action Group

**Evernet eG, Sundhausen**

BMBF-Projekt Vorhaben SupraCoNeX

**eye square GmbH, Berlin**

ZIM-Projekt Emotionserkennung

**GOM GmbH, Braunschweig**

BMBF-Projekt Deep Learning Lab

**Hella Aglaia Mobile Vision GmbH, Berlin**

BMW-Projekt KI-Absicherung

**HRCP Research and Development Partnership, Tokio, Japan**

EU-Japan-Projekt ThoR

**Hytera Mobilfunk GmbH, Bad Münde**

Projekt TETRA Frequenzplanung

**IAV GmbH, Gifhorn**

Forschungsprojekt AcuDia, akustische Diagnose in Fahrzeugen

Forschungsprojekt Record and Replay

**innovationslabor GmbH, Berlin**

BMBF-Projekt MindMarker

ZIM-Projekte Sprachverarbeitung

**Institut für Rundfunktechnik (IRT) GmbH, München**

5G Media Initiative

**Intel Deutschland GmbH, Neubiberg**

BMWi-Projekt KI-Absicherung

**ITUC, Lehre-Wendhausen**

BMBF-Projekt Deep Learning Lab

**ITU-T (International Telecommunications Union), Genf, Schweiz**

Internationale Standardisierung für Sprachkommunikation im Kfz (SG12)

**iTUBS (Innovationsgesellschaft Technische Universität Braunschweig mbH)**

Technologietransferzentrum Sprachtechnologie

Vorsitz des Aufsichtsrates

**Iquadrat Informatica, Barcelona, Spanien**

EU-Projekt 5GWireless

**Linguwerk GmbH, Dresden**

ZIM-Projekt HIFI-AEC

**Merantix GmbH, Berlin**

BMWi-Projekt KI-Absicherung

**Mind Intelligence UG, Berlin**

BMBF-Projekt MindMarker, Emotionserkennung in Sprache

**MOSEK, Kopenhagen, Dänemark**

EU-H2020-Forschungsvorhaben Netzwerkoptimierung

**NEC Corporation, Tokio, Japan**

EU-Japan-Projekt ThoR

**Neurocat GmbH, Berlin**

BMWi-Projekt KI-Absicherung

**NewMedia-Net GmbH, Bensheim**

BMBF-Projekt Vorhaben SupraCoNeX

**Nokia Bell-Labs, Paris, Frankreich**

EU-H2020-Forschungsvorhaben Netzwerkoptimierung

**NXP Semiconductors, Leuven, Belgien**

Forschungsprojekte Sprachverarbeitung

**Opel Automobile GmbH, Rüsselsheim am Rhein**

BMWi-Projekt KI-Absicherung

**OTEAcademy, Athen, Griechenland**

EU-Projekt 5GWireless

**Pan Acoustics GmbH, Wolfenbüttel**

Forschungsprojekt Digitales Mikrofonarray mit intelligenter Soft-Audiodecodierung

**PhySec GmbH, Bochum**

Forschungsvorhaben Sicherheit auf der Übertragungsschicht

**PreHCM Services GmbH, Miltenberg**

Projekt Drohnen in Mobilfunknetzen

Projekt Smart Coordination

**RAI Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica, Turin, Italien**

Forschungsprojekt Tower Overlay over LTE-A+

**Robert Bosch Car Multimedia GmbH, Hildesheim**

BMBF-Projekt Deep Learning Lab

**Robert Bosch GmbH, Stuttgart**

BMWi-Projekt KI-Absicherung

BMBF-Projekt KI-Plattformkonzept

**Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, München**

Forschungsprojekt FeMBMS

5G Media Initiative

**Siklu Communication Ltd, Petach Tikva, Israel**

EU-Japan-Projekt ThoR

**Siradel, Rennes, Frankreich**

EU-Projekt 5GWireless

**Südwestrundfunk (SWR), Stuttgart**

5G Media Initiative

**towerCast, Paris, Frankreich**

Forschungsprojekt FeMBMS

**TTI Norte, Spanien**

EU-Projekt 5GWireless

**understandAI GmbH, Karlsruhe**

BMWi-Projekt KI-Absicherung

**Valeo Schalter und Sensoren GmbH, Kronach**

BMWi-Projekt KI-Absicherung

**Verband der Automobilindustrie e.V., Berlin**

BMBF-Projekt KI-Plattformkonzept

**Viscom AG, Hannover**

BMBF-Projekt Deep Learning Lab

**Visteon Electronics Germany GmbH, Karlsruhe**

BMWi-Projekt KI-Absicherung

BMBF-Projekt KI-Plattformkonzept

**Vivid Components, Paderborn**

EU-Projekt TERAPOD

EU-Japan-Projekt ThoR

**VLC Photonics, Valencia, Spanien**

EU-Projekt TERAPOD

**Volkswagen AG, Wolfsburg**

BMBF-Projekt Deep Learning Lab

BMBF-Projekt KI-Plattformkonzept

Forschungsprojekt Generative Adversarial Networks

Forschungsprojekt Corner Case Detection

Promotionsvorhaben Intentionserkennung und Szenenanalyse

Promotionsvorhaben KI-Lernstrategien

BMWi-Projekt KI-Absicherung

Promotionsvorhaben Device-to-Device-Kommunikation

Promotionsvorhaben Hybride Netze

Forschungsprojekt Lokalisation

BMBF-Projekt 5G NetMobil

Projekt 5G Wolfsburg

**Wente/Thiedig GmbH, Braunschweig**

BMBF-Projekt Deep Learning Lab

**ZentiConnect UG, München**

EXIST Forschungstransfer, Startup WiFi-Optimierung

**ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen**

BMWi-Projekt KI-Absicherung

BMBF-Projekt KI-Plattformkonzept

**Kontakte zu Forschungseinrichtungen****Bar-Ilan Universität, Tel-Aviv, Israel**

Forschungsvorhaben Verteilte Vielfachzugriffstechniken

Forschungsvorhaben Maschinell gelerntes akustisches Frontend

**Bergische Universität Wuppertal, Lehrstühle Stochastik,  
Hochleistungsrechnen, Zuverlässigkeitstechnik und Risikoanalytik**

BMWi-Projekt KI-Absicherung

**Carl von Ossietzky Universität, Zentrum für Recht der  
Informationsgesellschaft, Oldenburg**

BMBF-Projekt KI-Plattformkonzept



**Chiba Institute of Technology, Narashino, Japan**

EU-Japan-Projekt ThoR

**Centre national de la recherche scientifique (CNRS), Paris, Frankreich**

EU-Projekt 5GWireless

**Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik, Braunschweig**

BMWi-Projekt KI-Absicherung

BMBF-Projekt KI-Plattformkonzept

**Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT), Tunis, Tunesien**

DAAD-Studentenaustausch

Forschungsvorhaben Handschrifterkennung

**Energieforschungszentrum Niedersachsen (EFZN), Goslar**

Vorsitz des Aufsichtsrates

**Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik (IAF), Freiburg**

EU-Japan-Projekt ThoR

**Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen (IIS), Erlangen**

Forschungsvorhaben Sprachverarbeitung

5G Media Initiative

**Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme (IAIS), Sankt Augustin**

BMWi-Projekt KI-Absicherung

**Fraunhofer-Institut für Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut (HHI), Berlin**

BMBF-Vorhaben SupraCoNeX

**Fraunhofer-Institut für Sichere Informationstechnologie (SIT), Darmstadt**

BMBF-Projekt KI-Plattformkonzept

**Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM), Kaiserslautern**

BMBF-Projekt KI-Plattformkonzept

**Gifu University, Gifu, Japan**

EU-Japan-Projekt ThoR

**Heriot-Watt Universität, Edinburgh, Großbritannien**

EU-Projekt 5GWireless

**INESC Porto, Porto, Portugal**

EU-Projekt TERAPOD

**Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Forschungszentrum Informatik (FZI)**

BMWi-Projekt KI-Absicherung

**Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Hochfrequenztechnik und Elektronik**

European School of Antennas

**Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Mess- und Regelungstechnik**

BMBF-Projekt KI-Plattformkonzept

**Key State Lab for Railway Communication, Beijing Jiaotong University, Beijing, China**

Forschungsvorhaben Eisenbahnkommunikation

**Linköpings Universitet, Schweden**

EU-Projekt 5GWireless

**Max-Planck-Institut für Informatik, Saarbrücken**

BMBF-Vorhaben SupraCoNeX

**Medizinische Hochschule Hannover (MHH), Gehörimplantate**

Forschungsvorhaben Sprachverarbeitung

**Montanuniversität Leoben, Österreich**

BMBF-Vorhaben SupraCoNeX

**National Institute of Information and Communications Technology (NICT), Tokio, Japan**

Standardisierung IEEE 802.15 TAG THz

Vorbereitung Weltfunkkonferenz 2019

**National Physics Laboratory, Teddington, Großbritannien**

EU-Projekt TERAPOD

DFG-Forschungsgruppe Meteracom

**Phillips-Universität Marburg**

DFG-Forschungsgruppe Meteracom

**Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig**

Forschungsvorhaben Akustik

DFG-Forschungsgruppe Meteracom

**Tarbiat Modares Universität, Teheran, Iran**

DFG-Projekt ALDINE

**Technische Universität Braunschweig, Institut für Datentechnik und Kommunikationsnetze (IDA)**

DFG-Forschungsgruppe Meteracom

**Technische Universität Braunschweig, Institut für Flugführung**

Graduiertenschule KoMMA.G

**Technische Universität Braunschweig, Institut für Gebäude- und Solartechnik (IGS)**

BMWi-Projekt EnEff Campus 2020

**Technische Universität Braunschweig, Institut für Hochfrequenztechnik (IHF)**

DFG-Forschungsgruppe Meteracom

Forschungsprojekt Lokalisation

**Technische Universität Braunschweig, Institut für Konstruktionstechnik**

Graduiertenschule KoMMA.G

**Technische Universität Braunschweig, Institut für Pharmazie- und Wissenschaftsgeschichte**

Graduiertenschule KoMMA.G

**Technische Universität Braunschweig, Institut für Psychologie**

Graduiertenschule KoMMA.G

**Technische Universität Braunschweig, Niedersächsisches Forschungszentrum Fahrzeugtechnik (NFF)**

Forschungsprojekt Generative Adversarial Networks

Forschungsprojekt Corner Case Detection

Forschungsprojekt Lokalisation

**Technische Universität Dresden, Mess- und Sensorsystemtechnik**  
DFG-Projekt PILSMOTS

**Technische Universität Dresden, Rechnernetze**  
DFG-Projekt RoyRayBen

**Technische Universität Ilmenau, Institut für Informationstechnik**  
DFG-Forschungsgruppe Meteracom

**Technische Universität München, Lehrstuhl für Informatikanwendungen in der Medizin & Augmented Reality**  
BMWi-Projekt KI-Absicherung

**Technische Universität München, Theoretische Informationstechnik**  
DFG-Projekt Play-Scate

**TUBS.digital der TU Braunschweig**  
Mitgliedschaften im Forschungszentrum für Digitalisierung, Informatik und Informationstechnik

**Università di Bologna, Italien**  
European School of Antennas

**Universität des Saarlandes, Institut für Rechtsinformatik, Saarbrücken**  
BMBF-Projekt KI-Plattformkonzept

**Universität Hamburg, Signalverarbeitung**  
Forschungsvorhaben Sprachverarbeitung

**Universität Heidelberg, Heidelberg Collaboratory for Image Processing (HCI)**  
BMWi-Projekt KI-Absicherung

**Universität Paderborn**  
DFG-Forschungsgruppe Meteracom

**Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona, Spanien**  
EU-Projekt 5GWireless

**Universität Stuttgart, Institut für Robuste Leistungshalbleitersysteme**  
EU-Japan-Projekt ThoR  
DFG-Forschungsgruppe Meteracom

**Universität zu Lübeck, Institut für Technische Informatik**

DFG-Forschungsgruppe Meteracom

**Université Catholique de Louvain, Belgien**

European School of Antennas

**Université de Lille, Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologie, Lille, Frankreich**

EU-Japan-Projekt ThoR

**University College Dublin, Irland**

EU-H2020-Forschungsvorhaben Netzwerkoptimierung

**University College London**

EU-Projekt TERAPOD

**University of Glasgow, Großbritannien**

EU-Projekt TERAPOD

**University of Oulu, Finnland**

EU-H2020-Forschungsvorhaben Netzwerkoptimierung

**WASEDA University, Tokio, Japan**

EU-Japan-Projekt ThoR

**Waterford Institute of Technology, Irland**

EU-Projekt TERAPOD

**Zeppelin Universität, Center for Mobility Studies, Friedrichshafen**

BMBF-Projekt KI-Plattformkonzept

## Vorträge und Veröffentlichungen

- [BAE/FIN1] Bär, A.; Hüger, F.; Schlicht, P.; Fingscheidt, T.: *On the Robustness of Redundant Teacher-Student Frameworks for Semantic Segmentation*. In Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition – Workshops, elektronisch (9 Seiten), Long Beach, CA, USA, Juni 2019.
- [BES/JAND/LIN/JOR1] Besser, K.-L.; Janda, C.; Lin, P.-H.; Jorswieck, E. A.: *Flexible Design of Finite Blocklength Wiretap Codes by Autoencoders*. In Proc. of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), S. 2512-2516, Brighton, United Kingdom, August 2019.
- [BOL/BAE/FIN1] Bolte, J.-A.; Bär, A.; Lipinski, D.; Fingscheidt, T.: *Towards Corner Case Detection for Autonomous Driving*. In Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, S. 438-445, Paris, Frankreich, Juni 2019.
- [BOL/FIN1] Bolte, J.-A.; Kamp, M.; Breuer, A.; Homoceanu, S.; Schlicht, P.; Hüger, F.; Lipinski, D.; Fingscheidt, T.: *Unsupervised Domain Adaptation to Improve Image Segmentation Quality Both in the Source and Target Domain*. In Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition – Workshops, elektronisch (10 Seiten), Long Beach, CA, USA, Juni 2019.
- [BOL/FIN2] Breuer, A.; Elfein, S.; Joseph, T.; Bolte, J.-A.; Homoceanu, S.; Fingscheidt, T.: *Analysis of the Effect of Various Input Representations for LSTM-Based Trajectory Prediction*. In Proc. of IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, elektronisch (8 Seiten), Auckland, Neuseeland, Oktober 2019.
- [DRE/KÜR3] Dreyer, N.; Kürner, T.: *An Analytical Raytracer for Efficient D2D Path Loss Predictions*. In Proc. of the 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), elektronisch (5 Seiten), Krakau, Polen, Oktober 2019.

- [DRE/KÜR4] Dreyer, N.; Gerald, A.; Hein, M.; Backwinkel, F.; Kürner, T.:  
*Evaluating Automotive Antennas for Cellular Radio Communications*. In Proc. of the International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE) 2019, elektronisch (5 Seiten), Graz, Österreich, November 2019.
- [ECK/DOE/REY/KÜR2] Eckhardt, J. M.; Doeker, T.; Rey, S.; Kürner, T.:  
*Measurements in a Real Data Centre at 300 GHz and Recent Results*. In Proc. 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), elektronisch (5 Seiten), Krakau, Polen, April 2019.
- [ECK/REY/KÜR1] Guan, K.; Peng, B.; He, D.; Eckhardt, J. M.; Rey, S.; Ai, B.; Zhong, Z.; Kürner, T.:  
*Measurement, Simulation, and Characterization of Train-to-Infrastructure Inside-Station Channel at the Terahertz Band*. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, Vol. 9, No. 3, S. 291-306, 2019.
- [ECK/REY/KÜR2] Guan, K.; Peng, B.; He, D.; Eckhardt, J. M.; Rey, S.; Ai, B.; Zhong, Z.; Kürner, T.:  
*Channel Characterization for Intra-Wagon Communication at 60 and 300 GHz Bands*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 68, No. 6, S. 5193-5207, 2019.
- [ELS/FIN1] Elshamy, S.; Fingscheidt, T.:  
*DNN-Based Cepstral Excitation Manipulation for Speech Enhancement*. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, Vol. 27, No. 11, S. 1803-1814, November 2019.
- [ELS/FIN2] Elshamy, S.; Fingscheidt, T.:  
*Improvement of Speech Residuals for Speech Enhancement*. In Proc. of IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, S. 214-218, New Paltz, NY, USA, Oktober 2019.

- [FIN1] Nogueira, W.; Abel, J.; Fingscheidt, T.:  
*Artificial Speech Bandwidth Extension Improves Telephone Speech Intelligibility and Quality in Cochlear Implant Users*. Journal of the Acoustical Society of America, Acoustical Society of America, Vol. 145, No. 3, S. 1640-1649, 2019.
- [FIN2] Abel, J.; Fingscheidt, T.:  
*Sinusoidal-Based Lowband Synthesis for Artificial Speech Bandwidth Extension*. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, Vol. 27, No. 4, S. 765-776, April 2019.
- [FIN3] Breuer, A.; Kirschner, J.; Homoceanu, S.; Hüger, F.; Schlicht, P.; Fingscheidt, T.:  
*Towards Tactical Maneuver Detection for Autonomous Driving Based on Vision Only*. In Proc. of IEEE Intelligent Vehicles Symposium, S. 941-948, Paris, Frankreich, Juni 2019.
- [FRA/FIN1] Meyer zum Alten Borgloh, I.; Franzen, J.; Fingscheidt, T.:  
*On the Performance of the Partitioned Versus Non-Partitioned Stereo Frequency Domain Adaptive Kalman Filter in In-Car Communication Systems*. In Proc. of DAGA, S. 1394-1397, Rostock, März 2019.
- [FRA/FIN2] Franzen, J.; Fingscheidt, T.:  
*Improved Measurement Noise Covariance Estimation for N-Channel Feedback Cancellation Based on the Frequency Domain Adaptive Kalman Filter*. In Proc. of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), S. 965-969, Brighton, United Kingdom, Mai 2019.
- [JOR/LIN1] Jorswieck, E. A.; Lin, P.-H.:  
*Ultra-Reliable Multi-Connectivity With Negatively Dependent Fading Channels*. In Proc. International Symposium on Wireless Communication Systems, elektronisch (6 Seiten), Oulu, Finnland, September 2019.



- [JOR1] Sinaie, M.; Ng, D. W. K.; Jorswieck, E. A.: *Resource Allocation in NOMA Virtualized Wireless Networks Under Statistical Delay Constraints*. IEEE Wireless Communications Letters, Vol. 7, No. 6, S. 954-957, 2018.
- [JOR2] Simsek, M.; Höfler, T.; Jorswieck, E. A.; Klessig, H.; Fettweis, G.: *Multi-Connectivity in Multi-Cellular, Multi-User Systems: A Matching-Based Approach*. Proc. of the IEEE, Vol. 107, No. 2, S. 394-413, 2019.
- [JOR3] Efazati, S.; Ghalamkari, B.; Azmi, P.; Jorswieck, E. A.: *Quality of Service Performance Analysis of Relaying Networks With Multiple Buffer-Aided Relays*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 68, No. 4, S. 4016-4026, 2019.
- [JOR4] Chour, H.; Jorswieck, E. A.; Bader, F.; Nasser, Y.; Bazzi, O.: *Global Optimal Resource Allocation for Efficient FD-D2D Enabled Cellular Network*. IEEE Access, Vol. 7, No. 1, S. 59690-59707, 2019.
- [JOR5] Kuhn, C.; Beck, M.; Schiffner, S.; Jorswieck, E. A.; Strufe, T.: *On Privacy Notions in Anonymous Communication*. Proceedings on Privacy Enhancing Technologies, De Gruyter Online, Vol. 2019, No. 2, S. 105-125, 2019.
- [JOR6] Li, G.; Sun, C.; Zhang, J.; Jorswieck, E. A.; Xiao, B.; Hu, A.: *Physical Layer Key Generation in 5G and Beyond Wireless Communications: Challenges and Opportunities*. Entropy, MDPI, Vol. 21, No. 5, S. 497, 2019.
- [JOR7] Abdelkader, A.; Jorswieck, E. A.: *Robust Adaptive Distributed Beamforming for Energy-Efficient Network Flooding*. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Springer, Vol. 2019, No. 154, elektronisch (15 Seiten), 2019.

- [JOR8] Matthiesen, B.; Jorswieck, E. A.: *Efficient Global Optimal Resource Allocation in Non-Orthogonal Interference Networks*. IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 67, No. 21, S. 5612-5627, 2019.
- [JOR9] Matthiesen, B.; Jorswieck, E. A.: *Global Energy Efficiency Maximization in Non-Orthogonal Interference Networks*. In Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), S. 4834-4838, Brighton, United Kingdom, Mai 2019.
- [JOR10] Matthiesen, B.; Zappone, A.; Jorswieck, E. A.; Debah, M.: *Deep Learning for Real-Time Energy-Efficient Power Control in Mobile Networks*. In Proc. IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), elektronisch (5 Seiten), Cannes, Frankreich, Juli 2019.
- [JOR11] Matthiesen, B.; Hellings, C.; Jorswieck, E. A.: *Energy Efficiency: Rate Splitting vs. Point-to-Point Codes in Gaussian Interference Channels*. In Proc. IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), elektronisch (5 Seiten), Cannes, Frankreich, Juli 2019.
- [JOR12] Hu, Y.; Jorswieck, E. A.; Schmeink, A.: *Full-Duplex Relay in High-Reliability Low-Latency Networks Operating with Finite Blocklength Codes*. In Proc. International Symposium on Wireless Communication Systems, elektronisch (6 Seiten), Oulu, Finnland, September 2019.
- [JOR13] Hellings, C.; Matthiesen, B.; Jorswieck, E. A.; Utschick, W.: *Globally Optimal TIN Strategies With Time-Sharing in the MISO Interference Channel*. In Proc. European Signal Processing Conference (EUSIPCO), elektronisch (5 Seiten), A Coruña, Spanien, September 2019.

- [JOR14] Ahmed, A. M.; Sezgin, A.; Jorswieck, E. A.: *Impact of Spatial Correlation in MIMO Radar*. In Proc. Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, elektronisch (5 Seiten), Pacific Grove, CA, USA, Oktober 2019.
- [JUNG/DRE/ECK/KÜR1] Jung, B. K.; Dreyer, N.; Eckhardt, J. M.; Kürner, T.: *Simulation and Automatic Planning of 300 GHz Backhaul Links*. In Proc. IRmmW-THz, elektronisch (3 Seiten), Paris, Frankreich, September 2019.
- [KÜR1] Guan, K.; He, D.; Ai, B.; Matolak, D. W.; Wang, Q.; Zhong, Z.; Kürner, T.: *5-GHz Obstructed Vehicle-to-Vehicle Channel Characterization for Internet of Intelligent Vehicles*. IEEE Internet of Things Journal, Vol. 6, No. 1, S. 100-110, 2019.
- [KÜR2] He, D.; Ai, B.; Guan, K.; Wang, L.; Zhong, Z.; Kürner, T.: *The Design and Applications of High-Performance Ray-Tracing Simulation Platform for 5G and Beyond Wireless Communications: A Tutorial*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 21, No. 1, S. 10-27, 2019.
- [KÜR3] Aliev, R.; Jornod, G.; Hehn, T.; Kwoczek, A.; Kürner, T.: *Improving the Performance of High-Density Platooning Using Vehicle Sensor-Based Doppler-Compensation Algorithms*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, elektronisch (12 Seiten), 2019.
- [KÜR4] Vitucci, E. M.; Yu, F.; Possenti, L.; Zoli, M.; Fuschini, F.; Barbiroli, M.; Degli-Esposti, V.; Guan, K.; Kürner, T.: *A Study on Dual-Directional Mm-wave Indoor Channel Characteristics*. In Proc. 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), elektronisch (5 Seiten), Krakau, Polen, April 2019.

- [KÜR5] Guan, K.; Peng, B.; He, D.; Yan, D.; Ai, B.; Zhong, Z.; Kürner, T.: *Channel Sounding and Ray Tracing for Train-to-Train Communications at the THz Band*. In Proc. 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), elektronisch (5 Seiten), Krakau, Polen, April 2019.
- [KÜR6] Unterhuber, P.; Walter, M.; Schneckenburger, N.; Kürner, T.: *Joint Delay and Doppler Frequency Estimation for Scatterer Localization in Railway Environments*. In Proc. 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), elektronisch (5 Seiten), Krakau, Polen, April 2019.
- [KÜR7] Guan, K.; He, D.; Ai, B.; Peng, B.; Hrovat, A.; Kim, J.; Zhong, Z.; Kürner, T.: *Millimeter-Wave Communications for Smart Rail Mobility: From Channel Modeling to Prototyping*. In Proc. 2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), elektronisch (6 Seiten), Shanghai, China, Juni 2019.
- [KÜR8] Kürner, T.: *Regulatory Aspects of THz Communications and Related Activities Towards WRC 2019*. In Proc. 28th IEEE European Conference on Networks and Communications, elektronisch (2 Seiten), Valencia, Spanien, Juni 2019.
- [KÜR9] Paoloni, C.; Alexiou, A.; Bouchet, O.; Davy, A.; Ermolov, V.; Kürner, T.; Napier, B.; Sahin, O.: *ICT Beyond 5G Cluster: Seven H2020 for Future 5G*. In Proc. 28th IEEE European Conference on Networks and Communications, elektronisch (2 Seiten), Valencia, Spanien, Juni 2019.
- [KÜR10] Jornod, G.; El Assaad, A.; Kwocek, A.; Kürner, T.: *Packet Inter-Reception Time Modeling for High-Density Platooning in Varying Surrounding Traffic Density*. In Proc. 28th IEEE European Conference on Networks and Communications, S. 187-192, Valencia, Spanien, Juni 2019.

- [KÜR11] Jornod, G.; El Assaad, A.; Kwoczek, A.; Kürner, T.: *Prediction of Packet Inter-Reception Time for Platoo-ning using Conditional Exponential Distribution*. In Proc. International Symposium on Wireless Commu-nication Systems (ISWCS) 2019, S. 265-270, Oulu, Finnland, August 2019.
- [KÜR12] Humphreys, D.; Jukan, A.; Kürner, T.; Schneider, T.; Berekovic, M.; Kleine-Ostmann, T.; Koch, M.; Kall-fass, I.; Scheytt, C.; Thomä, R.: *An Overview of the Meteracom Project (Metrology for THz Communications)*. In Proc. 43rd WWRF Mee-ting, elektronisch (8 Seiten), London, Großbritanni-en, Oktober 2019.
- [KÜR13] Kürner, T.: *THz Communications – A Candidate for a 6G Radio? (Invited)*. In Proc. WPMC 2019, elektronisch (5 Sei-ten), Lissabon, Portugal, November 2019.
- [KÜR14] Kürner, T.: *ThoR – THz End-to-End Wireless Systems Supporting Ultra-High Data Rate Applications*. 7th EU-Japan Symposium on ICT Research and Innovation, Wien, Österreich, 3. Dezember 2018.
- [KÜR15] Kürner, T.: *Towards THz Communications – Measurements, De-monstrations and Simulations*. Invited Lecture at Tampere University, Tampere, Finnland, 22. Januar 2019.
- [KÜR16] Kürner, T.: *Standards Aspects of THz Communications*. Se-cond Towards TeraHertz Communications Workshop, Brüssel, Belgien, 7. März 2019.
- [KÜR17] Kürner, T.: *An Overview on European Research Towards THz Communications*. Terahertz System Application Pro-motion Council Meeting of Japan, Präsentation via Webconference, 25. März 2019.

- [KÜR18] Kürner, T.: *Towards Beyond 5G – A Perspective for THz Communications (Keynote Speech)*. Infocom Workshop on Ultra-high Broadband Terahertz Communication for 5G and Beyond Network, Paris, Frankreich, 29. April 2019.
- [KÜR19] Kürner, T.: *THz Wireless Transport Links for Beyond 5G Networks ThoR Project Overview and First Results*. NGMN Forum, Berlin, 14. Mai 2019.
- [KÜR20] Kürner, T.: *THz Communications – A Candidate for 6G?*. Terahertz Workshop 2019 – THz Communication & Sensor Technologies, Chantilly, Frankreich, 27. September 2019.
- [KÜR21] Kürner, T.: *ThoR – THz End-to-End Wireless Systems Supporting Ultra-High Data Rate Applications*. IEEE 5GWF'19 – Workshop: From Evolution to Revolution, a Roadmap for Beyond 5G, Dresden, 1. Oktober 2019.
- [KÜR22] Kürner, T.: *THz for High Bandwidth Communication (Invited)*. APC 2019 – The IET's Antennas and Propagation Conference, Birmingham, Großbritannien, 11. November 2019.
- [LIN/JOR/JAND1] Lin, P.-H.; Jorswieck, E. A.; Schaefer, R.; Janda, C.; Mittelbach, M.: *Copulas and Multi-User Channel Orders*. In Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC), elektronisch (6 Seiten), Shanghai, China, Juli 2019.
- [LIN/JOR/JAND2] Lin, P.-H.; Jorswieck, E. A.; Schaefer, R.; Janda, C.; Mittelbach, M.: *On Stochastic Orders and Fading Gaussian Multi-User Channels with Statistical CSIT*. In Proc. IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), S. 1497-1501, Paris, Frankreich, Juli 2019.

- [LIN/JOR1] Zappone, A.; Lin, P.-H.; Jorswieck, E. A.: *Secrecy Energy Efficiency for MIMO Single- and Multi-Cell Downlink Transmission with Confidential Messages*. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, Vol. 14, No. 8, S. 2059-2073, 2019.
- [LOE/BAE/FIN1] Löhdefink, J.; Bär, A.; Schmidt, N. M.; Hüger, F.; Schlicht, P.; Fingscheidt, T.: *On Low-Bitrate Image Compression for Distributed Automotive Perception: Higher Peak SNR Does Not Mean Better Semantic Segmentation*. In Proc. of IEEE Intelligent Vehicles Symposium, S. 424-431, Paris, Frankreich, Juni 2019.
- [LOH/FIN1] Lohrenz, T.; Li, W.; Fingscheidt, T.: *A New TIMIT Benchmark for Context-Independent Phone Recognition Using Turbo Fusion*. In Proc. IEEE Spoken Language Technology Workshop, S. 498-505, Athen, Griechenland, Dezember 2018.
- [NAN/SCHW/KÜR1] Nan, T.; Jornod, G.; Schweins, M.; Kwocek, A.; Kürner, T.: *Channel Models for the Simulation of Different RATs Applied to Platoon Emergency Braking*. In Proc. 28th IEEE European Conference on Networks and Communications, S. 193-197, Valencia, Spanien, August 2019.
- [REI1] Reimers, U.: *Frequenzen für 5G – ein Problem?*. Fernseh- und Kameratechnik, Schiele & Schön, Vol. 73, No. 3, S. 23-29, 2019.
- [REI2] Reimers, U.: *5G – Eine technische Betrachtung*. Breitbandgipfel Niedersachsen 2018, Osterholz-Scharmbeck, 4. Dezember 2018.
- [REI3] Reimers, U.: *Von TOoL+ zu FeMBMS – Integration eines Broadcast-Layers in die Mobilfunkwelt*. Akademie-Vorlesung im Schloss, Braunschweig, 27. Februar 2019.

- [REI4] Reimers, U.:  
*5G – ein Blick auf die Technik*. 1. Niedersächsische 5G Anwenderkonferenz, Hannover, 1. April 2019.
- [REI5] Reimers, U.:  
*Integrating a Broadcast Layer into Cellular Networks – from T0oL+ to FeMBMS*. Konferenz #5GMediaRoad2019, München, 9. Mai 2019.
- [REI6] Reimers, U.:  
*5G – ein Blick auf die Technik*. Mitgliederversammlung der Industrie- und Handelskammern Niedersachsens, Hannover, 17. Mai 2019.
- [REI7] Reimers, U.:  
*Media Distribution in the 21st Century*. European Broadcasting Union (EBU), 25th Technical Assembly, Cavtat, Kroatien, 14. Juni 2019.
- [REI8] Reimers, U.:  
*Rundfunkanwendungen im Standard 5G*. Workshop der Arbeitsgemeinschaft Privater Rundfunk (APR), Frankfurt (Main), 16. Juli 2019.
- [REI9] Reimers, U.:  
*5G – ein Blick auch auf die Technik*. Wirtschaftszusammenkunft der Industrie- und Handelskammer Braunschweig, Braunschweig, 19. September 2019.
- [REY/KÜR1] Peng, B.; Guan, K.; Rey, S.; Kürner, T.:  
*Power-Angular Spectra Correlation Based Two Step Angle of Arrival Estimation for Future Indoor Terahertz Communications*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 67, No. 11, S. 7097-7105, 2019.
- [REZ/JOR1] Rezvani, S.; Mokari, N.; Javan, M. R.; Jorswieck, E. A.:  
*Fairness and Transmission-Aware Caching and Delivery Policies in OFDMA-Based HetNets*. IEEE Transactions on Mobile Computing. Early Access, elektronisch (15 Seiten), 2019.



- [RIC/HOY1] Richter, L.; Hoyer, M.; Ilsen, S.:  
*A Software Defined Radio based FeMBMS Measurement Receiver: Test Results*. In Proc. 14th IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), elektronisch (9 Seiten), Jeju, Südkorea, Juni 2019.
- [RIC/REI1] Richter, L.; Reimers, U.:  
*FeMBMS an der TU Braunschweig mit Live-Demo*. Deutsche TV-Plattform – AG Media over IP, München, 13. Februar 2019.
- [RIC/REI2] Richter, L.; Reimers, U.:  
*5G Broadcast und der Rückkanal mit FeMBMS Live-Demo*. Technik- und Innovationsforum des VAUNET, München, 21. März 2019.
- [SCHR1] Schrieber, F.:  
*A Differential Detection Technique for Local Services in DAB Single Frequency Networks*. In Proc. 14th IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), elektronisch (7 Seiten), Jeju, Südkorea, Juni 2019.
- [STRA/FIN1] Strake, M.; Defraene, B.; Fluyt, K.; Tirry, W.; Fingscheidt, T.:  
*Separated Noise Suppression and Speech Restoration: LSTM-Based Speech Enhancement in Two Stages*. In Proc. IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, S. 234-238, New Paltz, NY, USA, Oktober 2019.
- [STRA/LOH/FIN1] Strake, M.; Behr, P.; Lohrenz, T.; Fingscheidt, T.:  
*Densenet BLSTM for Acoustic Modeling in Robust ASR*. In Proc. IEEE Spoken Language Technology Workshop, S. 6-12, Athen, Griechenland, Dezember 2018.
- [XU/ELS/ZHA/FIN1] Xu, Z.; Elshamy, S.; Zhao, Z.; Fingscheidt, T.:  
*Components Loss for Neural Networks in Mask-Based Speech Enhancement*. ArXiv e-prints. Available: <https://arxiv.org/abs/1908.05087>, elektronisch (12 Seiten), 2019.

- [XU/STRA/FIN1] Xu, Z.; Strake, M.; Fingscheidt, T.: *Concatenated Identical DNN (CI-DNN) to Reduce Noise-Type Dependence in DNN-Based Speech Enhancement*. In Proc. 27th European Signal Processing Conference, EUSIPCO 2019, elektronisch (5 Seiten), A Coruña, Spanien, September 2019.
- [ZHA/ELS/FIN1] Zhao, Z.; Elshamy, S.; Fingscheidt, T.: *A Perceptual Weighting Filter Loss for DNN Training in Speech Enhancement*. In Proc. Workshop on Application of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA), S. 224-228, New Paltz, NY, USA, September 2019.
- [ZHA/FIN1] Zhao, Z.; Liu, H.; Fingscheidt, T.: *Convolutional Neural Networks to Enhance Coded Speech*. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, Vol. 27, No. 4, S. 663-678, 2019.
- [ZHA/FIN2] Brauer, C.; Zhao, Z.; Lorenz, D.; Fingscheidt, T.: *Learning to Dequantize Speech Signals by Primal-dual Networks: an Approach for Acoustic Sensor Networks*. In Proc. International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), S. 7000-7004, Brighton, Großbritannien, Mai 2019.

## **Im Rahmen der Arbeiten nationaler und internationaler kooperativer Projekte wurden vorgelegt:**

- [BOL/FIN3] Bolte, J.-A.; Fingscheidt, T.: *Technische Konzeption einer KI-Plattform aus Sicht einer Wissenschaftseinrichtung: Datenrepräsentation*. Abschlussbericht BMBF, elektronisch (30 Seiten), November 2019.
- [DRE/KÜR1] Dreyer, N.; Gerald, A.; Backwinkel, F.; Hein, M.; Kürner, T.: *Evaluating Vehicular Antennas for Cellular Radio Communications*. In Proc. COST IRACON 9th MC Meeting and 9th Technical Meeting, elektronisch (6 Seiten), Dublin, Irland, Januar 2019.

- [DRE/KÜR2] Dreyer, N.; Janas, E. A.; Kürner, T.:  
*Evaluation of Veins and NS-3 for 802.11p Based Vehicular Communication*. In Proc. COST IRACON 10th MC and Technical Meeting, elektronisch (6 Seiten), Universität Oulu, Oulu, Finnland, Mai 2019.
- [ECK/DOE/KÜR1] Eckhardt, J. M.; Doeker, T.; Kürner, T.:  
*D4.3 Initial Characterisation of Systems*. Terahertz Based Ultra High Bandwidth Wireless Access Networks (TERAPOD), elektronisch (25 Seiten), März 2019.
- [ECK/DOE/REY/KÜR1] Eckhardt, J. M.; Doeker, T.; Rey, S.; Kürner, T.:  
*300 GHz Measurements in a Real Data Centre*. In Proc. COST IRACON 9th MC Meeting and 9th Technical Meeting, elektronisch (6 Seiten), Dublin, Irland, Januar 2019.
- [ECK/KÜR1] O'Mahony, N.; Eckhardt, J. M.; Kürner, T.; et al.:  
*D2.2 Revised Requirements and Scenario Specifications*. Terahertz Based Ultra High Bandwidth Wireless Access Networks (TERAPOD), elektronisch (21 Seiten), April 2019.
- [ECK/KÜR2] Eckhardt, J. M.; Petrov, V.; Moltchanov, D.; Kouche-ryavy, Y.; Kürner, T.:  
*Low THz Band Propagation Measurements for Beyond 5G Vehicular Communications*. IEEE 802.15 Document 15-19-0279-00-0thz, elektronisch (21 Seiten), Wien, Österreich, Juli 2019.
- [ECK1] Eckhardt, J. M.; Ahearne, S.; Boujnah, N.:  
*D6.3 Initial Simulation Demonstrator*. Terahertz Based Ultra High Bandwidth Wireless Access Networks (TERAPOD), elektronisch (23 Seiten), September 2019.
- [ELS/FIN3] Elshamy, S.; Fingscheidt, T.:  
*Aufbau eines „Deep Learning Lab“ als Ort innovativen studentischen Lernens im Themenkomplex Machine Learning in Zusammenarbeit mit regionalen Unternehmen*. Zwischenbericht BMBF, elektronisch (2 Seiten), Februar 2019.

- [ELS/FIN4] Elshamy, S.; Fingscheidt, T.: *Aufbau eines „Deep Learning Lab“ als Ort innovativen studentischen Lernens im Themenkomplex Machine Learning in Zusammenarbeit mit regionalen Unternehmen*. Zwischenbericht BMBF, elektronisch (2 Seiten), Juli 2019.
- [FRA/ZHA/FIN1] Borgmann, U.; Franzen, J.; Zhao, Z.; Fingscheidt, T.: *Entwicklung eines drahtlosen digitalen Mikrofonarray mit serverseitigem adaptivem Beamforming, intelligenter Audio-Soft-Decodierung zur Steigerung der Störungsresistenz und einer sehr niedrigen Latenz*. Zwischenbericht NBank, elektronisch (7 Seiten), April 2019.
- [JUNG/ECK/DRE/KÜR1] Jung, B. K.; Eckhardt, J. M.; Dreyer, N.; Kürner, T.: *D6.2 Concept for Software Simulation*. TeraHertz End-to-End Wireless Systems Supporting Ultra-High Data Rate Applications (ThoR), elektronisch (19 Seiten), Juli 2019.
- [JUNG/ECK/DRE/KÜR2] Jung, B. K.; Eckhardt, J. M.; Dreyer, N.; Kürner, T.: *Simulation and Automatic Planning of 300 GHz Backhaul Links*, IEEE 802.15 Document 15-19-0278-01-0thz, elektronisch (21 Seiten), Wien, Österreich, Juli 2019.
- [JUNG/KÜR1] Jung, B. K.; Juncik, P.; Dan, I.; Sasaki, E.; Kürner, T.: *D2.4 Definition of Scenarios for Demonstration and Simulation*. TeraHertz End-to-End Wireless Systems Supporting Ultra-High Data Rate Applications (ThoR), elektronisch (26 Seiten), Juli 2019.
- [JUNG1] Hirata, A.; Jung, B. K.; Hisatake, S.; Kawanishi, T.: *D5.2: Preliminary Antenna, Propagation and Channel Models*. THz End-to-End Wireless Systems Supporting Ultra-High Data Rate Applications (ThoR), elektronisch (41 Seiten), Oktober 2019.
- [KÜR23] Leiba, Y.; Timar, R.; Sasaki, E.; Kondou, K.; Kürner, T.: *D2.2 Overall System Design*. THz End-to-End Wireless Systems Supporting Ultra-High Data Rate Applications (ThoR), elektronisch (9 Seiten), April 2019.

- [KÜR24] Kürner, T.:  
*D7.6 Interim Standardisation Report. Terahertz Based Ultra High Bandwidth Wireless Access Networks (TERAPOD)*, elektronisch (109 Seiten), April 2019.
- [KÜR25] Hirata, A.; Kürner, T.; Sasaki, E.; Hisatake, S.; Leiba, Y.:  
*D7.4 Report on Standards Activity 12M. THz End-to-End Wireless Systems Supporting Ultra-High Data Rate Applications (ThoR)*, elektronisch (206 Seiten), Juni 2019.
- [KÜR26] Guan, K.; Peng, B.; He, D.; Yan, D.; Ai, B.; Zhong, Z.; Kürner, T.:  
*Channel Sounding and Ray Tracing for Train-to-Train Communications at the THz Band*. IEEE 802.15 Document 15-19-0096-00-0thz, elektronisch (13 Seiten), Vancouver, Kanada, März 2019.
- [MEY/FIN1] Meyer, P.; Fingscheidt, T.:  
*Entwicklung eines Expertensystems zur echtzeitigen und dynamischen Beratung von Nutzern von Onlinehandelsplattformen auf Basis der Analyse ihrer Präferenzen durch Verhaltensmuster und Erkennung von Emotionen in akustischen Signalen*. Abschlussbericht AiF ZIM, elektronisch (17 Seiten), April 2019.
- [MEY/LOH/FIN1] Meyer, P.; Lohrenz, T.; Fingscheidt, T.:  
*HIFI-AEC: Entwicklung einer Technologie zur akustischen Echokompensation von Stereosignalen*. Abschlussbericht AiF ZIM, elektronisch (13 Seiten), November 2019.
- [REY/KÜR2] Rey, S.; Kürner, T.:  
*ThoR: Initial Results on Sharing Studies*. IEEE 802.15 Document 15-19-0095-00-0thz, elektronisch (21 Seiten), Vancouver, Kanada, März 2019.
- [REY1] Rey, S.:  
*D5.1 Initial Results on Sharing Studies*. TeraHertz End-to-End Wireless Systems Supporting Ultra-High Data Rate Applications (ThoR), elektronisch (20 Seiten), Dezember 2018.

[REY2]

Rey, S.:

*ThoR Deliverable 5.1: Initial Results on Sharing Studies*. Nationale Vorbereitungsgruppe für die WRC 2019 – Arbeitskreis 1, Dokument AK1-WRC19(19)Info08, elektronisch (20 Seiten), Bonn, März 2019.

[SCHW/KÜR1]

Schweins, M.; Talvitie, J.; Koivisto, M.; Kürner, T.:

*Position Awareness for Drones to Facilitate Beamforming*. In Proc. COST IRACON 10th MC and scientific meeting, elektronisch (5 Seiten), Oulu, Finnland, Mai 2019.

## **Kolloquium Nachrichtentechnik (WS 2018/2019)**

- 27.11.2018 Ronert Obst, Head of Data Science, New Yorker GmbH, Braunschweig:  
*From Fashion Models to Neural Network Models*
- 11.12.2018 Manfred Reitmeier, Senior Director of R&D Transmitter Systems, Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, München:  
*5G Broadcast – Wie aus einer Vision eine Perspektive für einen ganzen Industriezweig wird*
- 29.01.2019 Dr. Bernd Sörries, Head of Regulation, WIK Consult GmbH, Bad Honnef:  
*Das Vergabeverfahren zu 5G: politische Ziele, regulatorische Vorgaben und Erwartungen von Anwendern*

## **Master- und Bachelorarbeiten**

Im Folgenden ist eine Übersicht über die am Institut im Berichtszeitraum abgeschlossenen studentischen Arbeiten aufgelistet. Da es sich dabei um Prüfungsleistungen handelt, ist ein Ausleihen der Arbeiten nicht möglich. Bei Interesse an einem der bearbeiteten Themen wenden Sie sich bitte an den jeweiligen Abteilungsleiter.

### **Abteilung für Elektronische Medien – Systemtheorie und Technik (Prof. Reimers)**

#### **Masterarbeiten**

- 19/001 Korsmeier, David: Layered Division Multiplexing zur Integration von Lokalen Services in Gleichwellennetzen
- 19/006 Zhang, Ziwen: Filterentwurf für die FBMC-Modulation in HFC-Netzen
- 19/009 Mahmoud, Mouhamed: Synchronisation von LTE-Broadcastübertragungen in einem Gleichwellennetz
- 19/015 Ritzi, Dirk: Datenanbindungskonzepte für Visible Light Communication Systeme

#### **Bachelor- und Projektarbeiten**

- 19/706 Gajewski, Sophia: Technische Untersuchung von Streaming-Angeboten
- 19/707 Kuhn, Philipp: Web-basierte Diagramme für Software Defined Radio
- 19/711 Prause, Max Leander: Carrier Aggregation in LTE-Advanced und 5G NR für dedizierte Broadcast-Träger
- 19/713 Diestelhorst, Morten; Hauk, Lennart: Untersuchung der Robustheit von Watermarking gegen Videotranscodierung

## **Abteilung Signalverarbeitung und Machine Learning (Prof. Fingscheidt)**

### **Masterarbeiten**

- 19/003 Wübbelmann, Felix Peter: Speech Coding Using Generative Adversarial Networks (GANs)
- 19/005 Baumann, Jan: Turbo-Fusion von Erkennen-Ensembles für die automatische Phonemerkennung
- 19/010 Prautzsch, Felix: Feature Space Quantization in Generative Adversarial Networks for Learned Image Compression
- 19/011 Haneberg, Jan: Untersuchung von Adversarial Attacks im Kontext einer Verkehrszeichendetektion
- 19/012 Rahmani, Fatma: A Comparative Study on Data Containers for Deep Learning
- 19/013 Hauschild, Torgren: Domänenanpassung für die automotiv Bildverarbeitung mit simulierten Daten
- 19/014 Rudnik, Mathias: Effiziente neuronale Faltungsnetzwerke zur Instanzsegmentierung von Verkehrsszenen

### **Bachelorarbeiten**

- 19/703 Kunz, Luca: Teamprojekt Digitale Signalverarbeitung Echtzeit – Lokalisierung von Sprechern mit einem zirkularen Mikrofonarray
- 19/708 Söhl, Conor: Frontend Development of a Tool for Corner Case Detection
- 19/709 Struß, Conrad: Development of a Broadband SNR Estimator with Neural Networks



## **Abteilung für Mobilfunksysteme (Prof. Kürner)**

### **Masterarbeiten**

- 19/002 Ramolla, Fabian: Analyse und Vergleich verschiedener Raytracer für die Prädiktion von Übertragungskanälen
- 19/004 Jung, Bo Kum: Investigations on THz Backhaul Links in Realistic Scenarios
- 19/007 Lauxtermann, Felix: Konzeptionierung und prototypische Umsetzung einer automatisierten, herstellerunabhängigen Zertifizierung von V2X-Steuergeräten nach ETSI ITS G5
- 19/008 Herold, Christoph: Implementierung und Evaluierung von Selbst-Konfigurations-Algorithmen zur automatischen Einbindung neuer Mobilfunkbasisstationen in ein bestehendes Mobilfunknetz
- 19/016 Doeker, Tobias: Funkkanalmessungen bei 300 GHz für Multi-Gigabit-Anwendungen im Flugzeug
- 19/017 Friebe, Björn: Evaluierung der Ortungsgenauigkeit von satellitengestützten Lokalisierungsdiensten mittels Raytracing

### **Bachelorarbeiten**

- 19/701 Schonebeck, Lennart: Evaluierung der Verwendung von Beamforming im Mobilfunk
- 19/702 Reinhardt, Carla Emma: Konzeption und Entwicklung eines Produktvideos für den Mobilfunknetzsimulator SiMoNe
- 19/704 Langelotz, Lennart: Signalverarbeitungsalgorithmen für Link-Level-Simulationen in der THz-Kommunikation
- 19/705 Schaser, Heinrich: Integration von CAD-Anwendungen in den Entwicklungsprozess des Mobilfunknetzsimulators SiMoNe
- 19/710 Mross, Marcel: Entwicklung eines realistischen Reflexionsmodells für Häuserwände
- 19/712 Marks, Hendrik: Analyse des Downlink-Datenverkehrs in LTE-Mobilfunknetzen

## Dissertationen

- Daniel Rüdiger Rother    Optimierung einer Software-Defined-Radio-Plattform  
am Beispiel des Systems Tower Overlay over LTE-A+
1. Ber.: Prof. Reimers  
2. Ber.: Prof. Ernst (TU Braunschweig)
- Promotion an der TU Braunschweig am 08.01.2019
- Simon Walz                Ein System zur Gerätevernetzung für das Energie-  
management
1. Ber.: Prof. Reimers  
2. Ber.: Prof. Wolf (TU Braunschweig)
- Promotion an der TU Braunschweig am 28.11.2019

## **Aus der Forschung**

### **Abteilung für Elektronische Medien – Systemtheorie und Technik (Reimers)**

#### **1. Forschungsfelder der Abteilung**

Ein wichtiges, bereits nahezu traditionelles, Forschungsthema des Berichtszeitraums (1. Dezember 2018 bis 30. November 2019) waren „Kooperationsmodelle zwischen Broadband und Broadcast“ [RIC/HOY1], [REI7]. Nachdem das für die Entwicklung der Mobilfunk-Standards zuständige Gremium „Third Generation Partnership Project (3GPP)“ mit der Standardisierung von „Further evolved Multimedia Broadcast Multicast Service (FeMBMS)“ wesentliche Elemente des von uns erfundenen TOL+ (Tower Overlay over LTE-A+) übernommen hatte, gerieten wir in die ungewöhnliche Situation, mit unseren in FeMBMS konvertierten Systemen auf der Sende- und insbesondere der Empfangsseite in diverse Feldversuche eingebunden zu werden. Mittlerweile hat sich für FeMBMS der Name „5G Broadcast“ eingebürgert. Gestartet haben wir die Arbeiten an einem „5G New Radio Multimedia Broadcast Multicast Service“ (NR-MBMS). Die Forschungen zur Erweiterung des Digitalen Hörfunks (DAB+) um die Fähigkeit zur Unterstützung lokaler Angebote konnten auf Basis eines eigenen Sendernetzes fortgeführt werden. In einem weiteren Vorhaben widmen wir uns der potentiellen Weiterentwicklung eines Systems zur breitbandigen und hochdatenratigen Kommunikation auf Kabelnetzen. Ein WiMi erweiterte das Arbeitsgebiet Visible Light Communication (VLC) durch den Ausbau unseres Forschungs-Demonstrators.

Unsere Arbeiten umfassen die gesamte Spanne von der Grundlagenforschung, beispielsweise zu neuartigen Modulationsverfahren, bis hin zur Vorentwicklung und der Realisierung von System-Demonstratoren, die wir in Feldtests erproben. Eine besondere Rolle spielt bei vielen unserer Forschungen das Software Defined Radio (SDR) auf Basis des leistungsfähigen institutseigenen SDR-Werkzeugkastens (IfN Generic SDR Toolkit – IGST).

#### **2. Projekte**

Es ist überaus erfreulich, dass drei unserer Wissenschaftler in Forschungsvorhaben mit Partnerunternehmen eingebunden sind. Im Berichtszeitraum sind bzw. waren wir in den folgenden internationalen und nationalen Forschungsvorhaben engagiert:

## **2.1 Internationale Projekte**

Die Forschungsarbeiten zu FeMBMS und die Beteiligung an Feldversuchen von FeMBMS fanden zusammen mit dem Forschungszentrum von Radio Italiana (Rai) und dem französischen Sendernetzbetreiber towerCast statt.

## **2.2 Nationale Projekte**

Das Unternehmen Rohde & Schwarz GmbH und Co. KG haben wir bei der Umsetzung unserer FeMBMS-Implementierung in ein Produkt unterstützt. Mit dem Cologne Broadcasting Center – dem Produktionsbetrieb der RTL-Gruppe – haben wir an diversen kleineren Vorhaben gearbeitet. Mitglied ist das IfN in der 5G Media Initiative. Prof. Reimers ist darüber hinaus Vorsitzender des Aufsichtsrates der iTUBS mbH und des Energieforschungszentrums Niedersachsen (EFZN).

## **3. Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Abteilung**

Herr von Beöczy (seit 01.01.2019), Herr Hoyer und Herr Richter bilden das 5G Broadcast/TOo5G-Team. Herr Schrieber komplettiert die Untersuchungen zur Ausstrahlung lokaler Dienste in einer zukünftigen Variante von DAB+. Herr Jackisch erforscht die Möglichkeiten zur Steigerung der in Kabelnetzen verfügbaren Datenrate jenseits der Möglichkeiten von DOCSIS 3.1. Herr Schlegel widmet sich der Visible Light Communication.

Unser Support-Team besteht aus Frau Andersen, Frau Brandt, Frau Haase, Frau Nottbohm, Frau Sengpiel und den Herren Eisenberger, Gudat und Hellrung.

Nicht vergessen werden dürfen die Studierenden, die mit ihren Bachelorarbeiten (vier im Berichtszeitraum), Masterarbeiten (vier im Berichtszeitraum) oder als studentische Hilfskräfte unsere Forschung ganz maßgeblich unterstützten. Im Jahresschnitt verstärkten so zu jeder Zeit etwa fünf Personen unsere Forschungskapazitäten, die im Personalverzeichnis des IfN nicht vermerkt sind.

## **4. 5G Broadcast (FeMBMS)**

Nachdem Feldversuche mit FeMBMS die interessanten Leistungsmerkmale des Systems gezeigt hatten, stößt das am IfN umgesetzte System nun weltweit auf großes Interesse. FeMBMS ermöglicht es unter anderem, Daten mittels eines dedizierten sogenannten Broadcast-Trägers über eine vorhandene High Tower High Power (HTHP)-Senderinfrastruktur auszustrahlen. Dies eröffnet das Potential, die konventionellen Mobilfunknetze zu entlasten und gleichzeitig ei-

ne große Anzahl von Nutzern mit Video-Diensten oder ähnlichen populären Diensten in hoher Qualität versorgen zu können. Auch wenn FeMBMS häufig als 5G Broadcast bezeichnet wird, basiert es doch auf dem Mobilfunkstandard Long Term Evolution (LTE). Einige Konzepte dieses Übertragungsmodus, bspw. ein kleinerer Subträgerabstand, stammen aus dem am IfN entwickelten Tower Overlay over LTE-A+ (TOoL+). Der minimale Subträgerabstand von 1,25 kHz und die vergleichsweise lange Schutzintervalldauer von 200  $\mu$ s für die Übertragung von Nutzdaten ermöglichen die Realisierung groß-zelliger Gleichwellennetze mit Senderabständen von bis zu 60 km.

Aus der gemeinsamen Kooperation des IfN mit Rohde & Schwarz (R&S) zur Entwicklung eines kommerziellen FeMBMS-Modulators ist mittlerweile ein marktfähiges Produkt entstanden. Dabei konnte die Standard-Konformität in Tests mit externen Partnern verifiziert werden. Die am IfN mittels Software Defined Radio entwickelte FeMBMS-Empfangssoftware ist nun Teil eines kommerziellen Empfängers, welcher über das R&S-Vertriebsnetz verkauft wird. So wurden zuletzt je einer unserer FeMBMS-Empfänger für Feldversuche nach China sowie nach Brasilien, dort für die System-Erprobung anlässlich des Festivals „Rock in Rio“, geliefert. Die Partner aus beiden Ländern bekundeten großes Interesse an einem Ausbau eines FeMBMS-Netzes. Ein FeMBMS-Gleichwellennetz konnte auch in Bayern realisiert werden, wo im Frühjahr 2019 im Rahmen des bayrischen Forschungsprojektes 5G TODAY zwei Sender in Betrieb genommen wurden [REI5]. Hierzu bietet der Sonderbericht auf Seite 126 weitere Information. In dem bayrischen Versorgungsgebiet bot Herr Richter Vorträge mit Live-Demonstrationen für die AG „Media over IP“ der Deutschen TV-Plattform [RIC/REI1] und das Technik- und Innovationsforum des Verbandes der kommerziellen Medienunternehmen VAUNET [RIC/REI2].

Ebenfalls im bayrischen Versorgungsgebiet unternahmen Herr Hoyer und Herr Richter im März mehrere Messfahrten, um die Leistungsfähigkeit des Übertragungssystems zu überprüfen. Dazu verwendeten sie handelsübliche Notebooks als Messempfänger, denn dank unserer Optimierung des SDR-basierten FeMBMS-Empfängers durch Einsatz noch effizienterer Algorithmen konnte die Rechenkomplexität soweit verringert werden, dass das FeMBMS-Signal auf solchen Geräten in Echtzeit dekodiert werden kann. Das vereinfachte Blockdiagramm in **Abbildung 1** zeigt die Struktur des Empfängers. Hervorzuheben ist die aufwändige, auf Feedbackschleifen aufbauende Aufteilung und Zuordnung von Ressourcen zur Dekodierung der vier verschiedenen Kontrollkanäle im sogenannten Cell Acquisition Subframe (CAS) und des Nutzkanals.

Im Rahmen der Messfahrten entstanden Ergebnisse, die Rückschlüsse auf Stärken und Schwächen von FeMBMS zulassen.

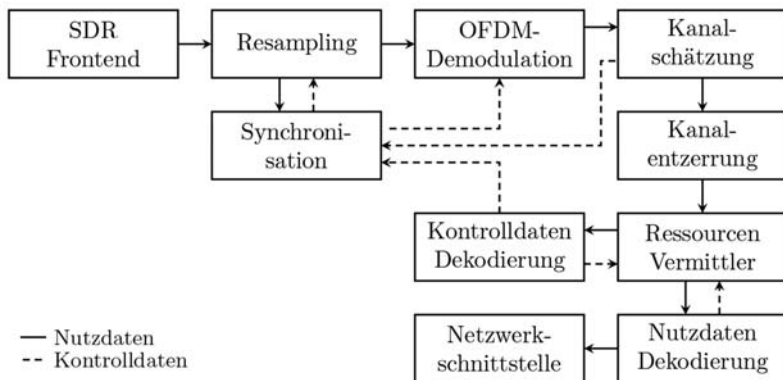


Abbildung 1: Vereinfachtes Blockdiagramm des FeMBMS-Empfängers

Das Hauptaugenmerk lag hierbei auf der Paketfehlerrate des CAS. Dieser wird benötigt, um Kontrollinformationen an die Empfänger zu übermitteln, damit jene die eigentlichen Nutzdaten, wie z.B. Video-Dienste empfangen und dekodieren können. Anders als die Nutzdaten verwendet der CAS einen Subträgerabstand von 15 kHz, wodurch dessen Schutzintervall mit  $16,67 \mu\text{s}$  deutlich kürzer ausfällt als das für die Nutzdaten und die Robustheit bei der Übertragung im Gleichwellennetz oder bei Mehrwegeausbreitung mit langen Echos sinkt. In **Abbildung 2** wird die Paketfehlerrate in Abhängigkeit von den Laufzeit-Unterschieden der eintreffenden Signale für CAS und Nutzdaten dargestellt. Wie zu erwarten, stellt das kurze Schutzintervall des CAS ein Problem bei spät eintreffenden Echos bzw. bei zwei aktiven Sendern dar [RIC/HOY1].

Im Berichtsjahr fanden auch funktionale Weiterentwicklungen der SDR-Implementierungen statt. Unter anderem kann nun eine Vielzahl verschiedener Dienste mittels einer FeMBMS-Übertragung gleichzeitig bereitgestellt werden. Dafür wurde die Nutzung von sogenannten MCH Scheduling Information (MSI) implementiert, welches eine dynamische Dekodierung von Diensten ermöglicht. Konnten vorher nur maximal vier verschiedene Dienste verarbeitet werden, so können nun bis zu 435 verschiedene Dienste empfangen und dekodiert werden. Mittels Carrier Aggregation kann ein FeMBMS-Träger den für die klassische bidirektionale Mobilkommunikation genutzten Trägern der zellularen Netze hinzugefügt werden. Die Bachelorarbeit [BA 19/711] widmete sich diesem Thema. Ein Netzwerk-Interface für das Auslesen von Messwerten wurde realisiert, wodurch sämtliche empfangenen Kontrollinformationen ausgewertet werden können. Zudem wurde unsere Modulator-seitige SDR-Lösung so erweitert, dass sie auch in Gleichwellennetzen genutzt werden kann. Die dafür benötigte Syn-

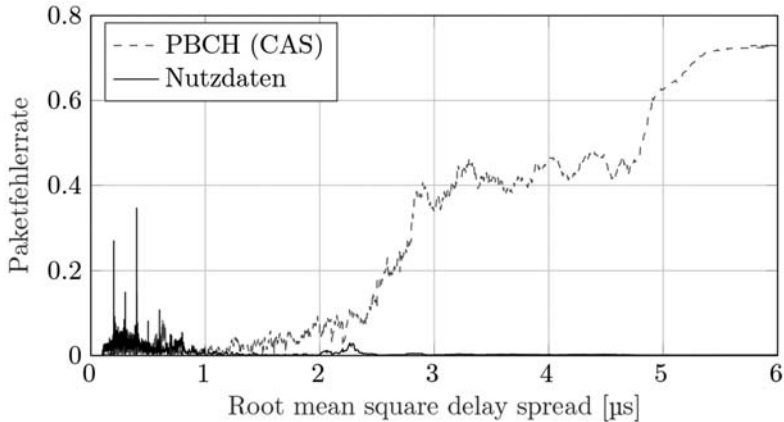


Abbildung 2: Vergleich der Paketfehlerraten des Physical Broadcast Channel im CAS und der Nutzdaten in Abhängigkeit vom mittleren Laufzeit-Unterschied der Signale

chronisierung mehrerer Sender wurde in Teilen im Rahmen einer Masterarbeit umgesetzt [MA 19/009]. Anlässlich des 10. Jubiläums des Braunschweiger Technologieforums am 23. Oktober zeigten wir FeMBMS dann auch in Braunschweig „live“. Zu diesem Zweck installierte Herr Schlegel einen FeMBMS-Sender auf dem sogenannten Architekten-Hochhaus der Universität und in den Räumen der Industrie- und Handelskammer konnte das Signal dann empfangen werden.

Aktuell wird das SDR-System um die Algorithmen des neuen Mobilfunkstandards 5G New Radio (NR) erweitert. In diesem Rahmen wird institutsintern an einem „5G New Radio Multimedia Broadcast Multicast Service“ (NR-MBMS) geforscht, mit dessen Hilfe ein Broadcast-Modus innerhalb des neuen Mobilfunkstandards realisiert werden soll. Wir wollen auf diese Weise unsere erfolgreiche Arbeit, die in FeMBMS ihren Niederschlag gefunden hat, für eine nächste Mobilfunk-Generation fortsetzen. Auch wenn der neue Mobilfunkstandard auf den ersten Blick viele Gemeinsamkeiten mit seinem Vorgänger Long Term Evolution (LTE) hat, so unterscheiden sich beide doch in vielen Details. So wird zwar erneut OFDM als Modulationsart genutzt, andere Algorithmen, wie der Fehler-schutz, wurden hingegen geändert. Wurde in LTE noch auf Turbo- und Faltungskodierung zurückgegriffen, so werden bei NR die effizienteren Low Density Parity Check (LDPC) und Polar Codes genutzt. Auch der bei NR unterstützte Frequenzbereich wurde gegenüber dem bei LTE stark nach oben erweitert. Zudem wurden gerade in den höheren Schichten viele Änderungen vorgenommen, um geringere Latenzzeiten und bessere spektrale Effizienz umsetzen zu können.

Das Thema 5G adressierten wir in einer Publikation [REI1] und zahlreichen Vorträgen [REI2], [REI4], [REI6], [REI8], [REI9]. Hier ging es weniger darum, unsere eigenen Forschungsarbeiten zu präsentieren, als vielmehr darum, Entscheidungsträgern aus der Wirtschaft das Thema so nahe zu bringen, dass sie zwischen 5G-Hype und Realität zu unterscheiden lernen.

## **5. Erweiterung von DAB+ zur Unterstützung lokaler Programmangebote**

Der digitale Hörfunk DAB+ wird derzeit in Deutschland eingeführt und soll den analogen Hörfunk als letztes analoges Massenmedium digitalisieren – nachdem dies beim Mobilfunk und beim Fernsehen längst erfolgt ist. Eine Besonderheit von DAB ist, dass es als erstes kommerzielles System die Übertragungstechnik OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) nutzt. Seitdem wird OFDM z.B. beim terrestrischen Fernsehen, dem Mobilfunk der 4. und 5. Generation (LTE, 5G) sowie im WLAN eingesetzt. Die Nutzung von OFDM ermöglicht es, dass DAB+-Sendernetze als Gleichwellennetze ausgelegt werden können, die besonders spektrums- und kosteneffizient sind. Der Nutzung von Gleichwellennetzen stehen aber aktuelle Geschäftsmodelle zahlreicher privater Hörfunkanbieter entgegen. Diese strahlen ihre UKW-Programme beispielsweise in Niedersachsen zwar über lange Zeiten des Tages landesweit aus, teilen das Versorgungsgebiet aber zu beliebigen Zeiten zur Ausstrahlung lokaler Nachrichten oder Werbeeinblendungen in lokale Versorgungsgebiete auf. Im Extremfall werden einzelne Lokalprogramme jeweils nur von einem einzigen UKW-Sender ausgestrahlt. Die lokal adressierte Werbung stellt für die kommerziellen Programmanbieter nach eigenen Aussagen eine erhebliche Einnahmequelle dar.

Die Akzeptanz von DAB+ in Deutschland wird beeinträchtigt, wenn private Programmanbieter ihre derzeitigen UKW-Geschäftsmodelle über DAB+ nicht realisieren können. Aus diesem Grund untersuchte Herr Schrieber im Auftrag der Niedersächsischen Landesmedienanstalt (NLM) und des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) mögliche Erweiterungen des derzeitigen DAB+-Standards. Diese Erweiterungen sollen die zeitweise Auseinanderschaltung von DAB+-Sendern innerhalb von Gleichwellennetzen ermöglichen und möglichst kompatibel zum derzeitigen DAB+-Standard sein. Dabei sollen die nicht lokal auseinandergeschalteten Programme innerhalb eines DAB-Signals, das in einem Multiplex zahlreiche Programme parallel überträgt, ungestört bleiben.

Nachdem Herr Schrieber eine Möglichkeit zur Erweiterung von DAB+ gefunden und per Software Defined Radio realisiert hatte, wurde ein „IfN-eigenes“ reales DAB+-Gleichwellennetz in Braunschweig realisiert. Dass die Lösung das angestrebte Ziel grundsätzlich erfüllt, konnte in mehreren Demonstrationen mit ei-



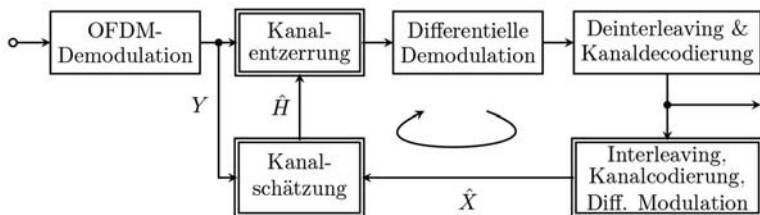


Abbildung 3: Die Struktur des iterativen Empfängers, wobei einfach umrandete Blöcke in gewöhnlichen Empfängern existieren und doppelt umrandete neu sind

nem handelsüblichen DAB+-Autoradio gezeigt werden. Die nicht lokal auseinander geschalteten Programme sind überall perfekt empfangbar. Die Empfangbarkeit der Lokalprogramme in der Nähe des jeweiligen Senders erfolgt störungsfrei. Zwischen den Sendern ist die prinzipiell nicht vermeidbare Interferenz jedoch so ausgeprägt, dass das jeweilige Lokalprogramm nicht empfangen werden kann. Die Größe der Region, in der die Interferenz zum Empfangsausfall führt, ist auch von Eigenschaften des Empfängers abhängig.

Um die Robustheit von Empfängern gegen derartige Interferenz weiter zu erhöhen, hat Herr Schrieber eine iterative Empfängertechnik untersucht. Die Struktur des Empfängers ist in **Abbildung 3** zu sehen: Neu gegenüber handelsüblichen Empfängern ist die explizite Kanalschätzung und Kanalentzerrung, die für die resultierende Erhöhung der Robustheit sorgt. Da das DAB+-System jedoch keine Pilotöne zur Kanalschätzung bereitstellt, muss die Kanalschätzung aus dem Empfangssignal  $Y$  und den vermutlich gesendeten Daten  $\hat{X}$  gewonnen werden. Dazu wird das Empfangssignal zuerst ohne vorherige Kanalentzerrung decodiert und anschließend wieder codiert, um die vermutlich gesendeten Daten zu erhalten. Daraus wird die Kanalschätzung  $\hat{H}$  gewonnen und genutzt, um das Empfangssignal zu entzerren und eine neue, fehlerärmere Vermutung für die gesendeten Daten zu erhalten. Diese Schleife wird so lange ausgeführt, bis sich die Vermutung über die gesendeten Daten und die Schätzung des Kanals nicht weiter verbessern. Herr Schrieber konnte zeigen, dass dieser Empfänger um 3 dB robuster gegenüber Interferenz ist, als ein handelsüblicher Empfänger. Das Ergebnis dieser Untersuchung wurde im Rahmen einer Konferenz vorgestellt und veröffentlicht [SCHR1].

Als neuen, jedoch mit dem heutigen DAB+-Standard nicht kompatiblen, Ansatz zur Einbringung von Lokalprogrammen untersuchte Herr Schrieber Layered Division Multiplexing (LDM) [MA 19/001]. Bei LDM werden mehrere Datenströme

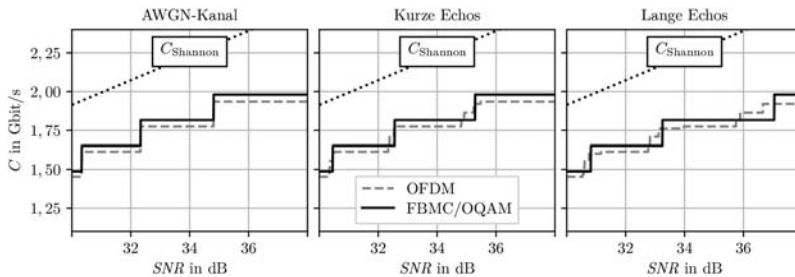


Abbildung 4: Nutzdatenraten von DOCSIS 3.1 mit OFDM als Funktion des Signal-Rausch-Verhältnisses (SNR) im Vergleich zu einer Alternative mit FBMC/OQAM

mit unterschiedlicher Leistung und Codierung zeitgleich im selben Kanal überlagert.

## 6. Optimierung der verfügbaren Datenraten in Hybrid-Fiber-Coax-Netzen

Für den Internetzugang in Fernsehkabelnetzen wird die „Data over Cable Service Interface Specification“ (DOCSIS) verwendet. Aktuell ist hierbei die Version DOCSIS 3.1, welche im sogenannten Downlink Datenraten im Gigabit-pro-Sekunde-Bereich ermöglicht, welche sich angeschlossene Endgeräte teilen. DOCSIS 3.1 nutzt das Mehrträger-Modulationsverfahren Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM). Jeder OFDM-Träger wird mit einer Quadraturamplitudenmodulation (QAM) versehen, welche bis zu 14 Bit pro Träger abbilden kann. Herr Jackisch untersuchte anfänglich die Leistungsfähigkeit von realistischen DOCSIS-3.1-Systemen. **Abbildung 4** zeigt unter anderem die maximal mögliche Nutzdatenrate der jeweils besten DOCSIS-3.1-Konfiguration in drei Arten von Übertragungskanälen bei verschiedenen Signal-Rausch-Verhältnissen (SNR). Dabei ergab sich, dass im sogenannten AWGN-Kanal mit additivem weißem gaußschen Rauschen das SNR bei einer gegebenen Datenrate ca. 5 dB größer sein muss, als dies theoretisch möglich wäre. In den ebenfalls dargestellten Echokanälen vergrößert sich der Abstand weiter, da Intersymbolinterferenz auftritt. Intersymbolinterferenz wird durch Echos hervorgerufen und wird in einem OFDM-System durch ein Schutzintervall kompensiert. Das Schutzintervall enthält jedoch keine Nutzdaten und verringert somit die Datenrate.

Um die Robustheit gegen Echos zu erhöhen, kann, so die Forschungs-Hypothese von Herrn Jackisch, das alternative Modulationsverfahren Filter Bank Multi-

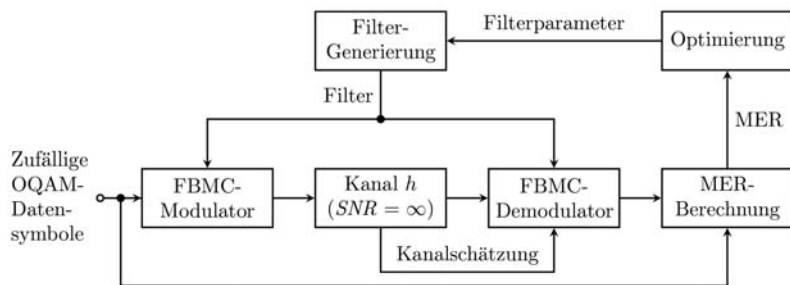


Abbildung 5: Blockschaltbild der FBMC-Filteroptimierung

Carrier (FBMC) mit Offset-QAM (OQAM) verwendet werden. FBMC/OQAM nutzt dabei ein zusätzliches Filter, wodurch Intersymbolinterferenz verringert wird, so dass auf das Schutzintervall verzichtet werden kann. In der Literatur wurden bereits einige Filter für FBMC/OQAM vorgeschlagen. Diese Filter hat Herr Jackisch als Basis zur Optimierung genommen [MA 19/006]. **Abbildung 5** zeigt das dazugehörige Blockschaltbild. Zur Untersuchung des möglichen Gewinns werden hier Zufallsdaten mithilfe eines FBMC/OQAM-Systems über typische Kabelkanäle übertragen. Die Modulationsfehlerrate (MER) beschreibt die Abweichungen zwischen den gesendeten und den empfangenen Symbolen. Das iterative Verfahren passt die Filterparameter so an, dass die Abweichungen minimiert werden. Die Optimierung wurde für fünf Arten von Filtern mit sechs Filterlängen und für drei Übertragungskanäle durchgeführt, um ideale Filter für verschiedene Szenarien zu finden.

**Abbildung 4** vergleicht die Datenraten für das optimierte FBMC/OQAM-System mit denen des OFDM-basierten DOCSIS 3.1. Dabei zeigt sich, dass FBMC/OQAM durch den Verzicht auf das Schutzintervall in den allermeisten Fällen eine höhere Datenrate erzielen kann. Durchschnittlich beträgt der Gewinn gegenüber OFDM ca. 0,5 dB.

Neben der Arbeit an Kabelnetzen betreute Herr Jackisch zwei Projekte und eine Bachelorarbeit. Ein Kooperationsprojekt mit dem Cologne Broadcasting Center (CBC) untersuchte die Robustheit von Watermarking, einem Verfahren um Signalisierungsinformationen unsichtbar in Videos einzubringen [BA 19/713]. Eine weitere Projektarbeit verglich die technischen Eigenschaften verschiedener Streaming-Angebote [BA 19/706]. Schließlich verbesserte eine Bachelorarbeit die Darstellung von Diagrammen im IfN Generic SDR Toolkit [BA 19/707].

## 7. Visible Light Communication

Unter dem Begriff Visible Light Communication (VLC) verbirgt sich die Datenübertragung über sichtbares Licht. Durch VLC kann eine herkömmliche LED-Deckenlampe gleichzeitig zur Beleuchtung und zur Datenübertragung dienen. Die Datenübertragung ist quasi die Nebenaufgabe zur eigentlichen Beleuchtung und für das menschliche Auge nicht sichtbar. VLC erlangt aufgrund des knappen werdenden Frequenzspektrums immer mehr an Bedeutung. Der Einsatz von VLC bietet sich auch in Bereichen an, in denen keine Funkübertragung möglich ist oder in denen eine Funkübertragung zur Störung wichtiger Systeme führen könnte. Im Institut für Nachrichtentechnik wurde bereits im Jahr 2016 im Rahmen von Untersuchungen zu VLC ein Demonstrator realisiert, der von Herrn Schlegel permanent weiterentwickelt wird. Bislang dienten Signale des Digitalen Fernsehens (DVB-T2), die per VLC übertragen wurden, zur Demonstration der Leistungsfähigkeit von VLC. In diesem Jahr konnte der Demonstrator zu einem Kommunikationssystem erweitert werden, in dem eine bidirektionale Datenübertragung zwischen einem VLC-Access-Point und einem VLC-Modem über sichtbares LED-Licht im Downlink und infrarotes Licht im Uplink möglich ist. Mit dieser Erweiterung kann nun eine Internetanbindung z.B. zu einem Laptop mittels VLC realisiert werden. Im Access-Point kommen handelsübliche LED-Einbaulampen zum Einsatz, die mit einem Gleichspannungsanteil für die Raumbeleuchtung und dem überlagerten Datensignal für den Downlink betrieben werden. Die Modulation ist für das menschliche Auge nicht sichtbar, so dass nur eine konstant leuchtende Lichtquelle wahrgenommen wird. Im VLC-Modem detektiert eine Fotodiode die auf das Licht aufmodulierten Datensignale, die anschließend über einen Verstärker zur weiteren Verarbeitung aufbereitet werden. Der Rückkanal basiert auf dem gleichen Konzept, nutzt aber infrarotes Licht für die Übertragung.

Die komplette digitale Signalverarbeitung sowie die Modulation und Demodulation im VLC-Access-Point und VLC-Modem übernehmen dabei zwei modifizierte Power-Line-Communication-Adapter (PLC-Modems), die zur Datenkommunikation jeweils über einen Ethernet-Anschluss verfügen [MA 19/015]. Die Modifikation ermöglicht den Zugriff auf die RX- und TX-Signale der PLC-Modems, deren Verbindung zur „Power-Line“ getrennt wurde. Da der Frequenzbereich dieser RX- und TX-Signale im nutzbaren Frequenzbereich des realisierten VLC-Übertragungssystems liegt, lassen sich beide Systeme ideal kombinieren. **Abbildung 6** zeigt das realisierte Gesamtsystem.

Um ein realistisches Anwendungsszenario zu präsentieren, wurde der VLC-Access-Point in die Decke eines Büros integriert, so dass nur noch die LED-Einbaulampen und der Infrarotempfänger zu sehen sind.

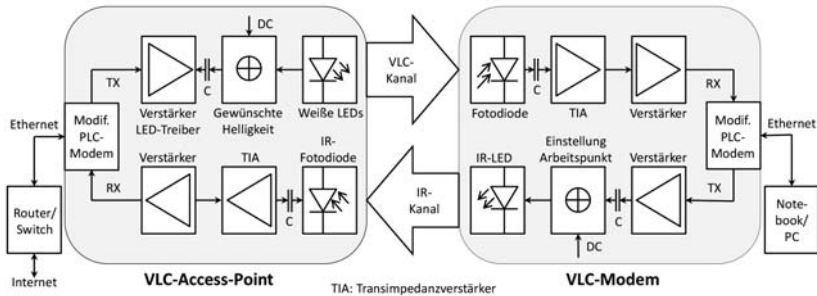


Abbildung 6: Blockschaltbild des VLC-Demonstrators

Der Demonstrator erlaubt derzeit eine Datenübertragung von über 50 Mbit/s im Downlink und über 80 Mbit/s im Uplink.

## 8. Arbeiten des IT-Serviceteams

Das IT-Serviceteam, bestehend aus Herrn Schlegel und Herrn Gudat, hat in diesem Jahr, neben den ständig anfallenden Aufgaben im IT-Bereich, auch diverse kleinere Projekte bearbeitet. Zu den regelmäßigen Aufgaben des Teams gehören administrative Arbeiten, der Betrieb der institutseigenen Server, die erforderliche Aktualisierung der Hardware und Software bei allen Instituts-Rechnern, allgemeine Reparaturen sowie anfallende Wartungsarbeiten. Besonders hervorzuheben ist dieses Mal die Umstellung nahezu aller Arbeitsplatzrechner auf Windows 10. Weiterhin wurden kleinere Hardwareentwicklungen durchgeführt und mehrere Server und Simulationsrechner neu beschafft und aufgesetzt. Ein Teil der institutseigenen Simulationsrechner (GPU-Cluster) konnte aufgrund hoher Lärm- und Wärmeentwicklung erstmals in den Maschinenraum des Gauß-IT-Zentrums ausgelagert werden.

# **Abteilung für Informationstheorie und Kommunikationssysteme (Jorswieck)**

## **1. Forschungsfelder der Abteilung**

Die neu gegründete Abteilung forscht zu neuen Methoden und Werkzeugen der angewandten Informationstheorie, die für die Analyse, die Optimierung und den Entwurf von modernen Kommunikationssystemen eingesetzt werden. Zum anderen arbeiten wir an dem Systementwurf in den folgenden vier Bereichen: PhySec – Sicherheit auf der Übertragungsschicht, CelCom – Zellulare Kommunikationssysteme, Wi-Fi – Moderne drahtlose lokale Netzwerke, Wireless Body Area Networks (WBAN) – drahtlose Netzwerke im und auf dem menschlichen Körper. Die Forschung konzentriert sich auf methodisch mathematische Kernthemen (Netzwerk-Informationstheorie, multikriterielle Optimierung, Spieltheorie, informationstheoretische Sicherheit, mehrkanalige Signalverarbeitung und maschinelles Lernen) und deren Anwendungen und Implementierungen in zeitgemäßen relevanten und aktuellen nachrichtentechnischen Verfahren und Systemen (Internet-der-Dinge (IoT), Industrie 4.0, Cyber Physical Systems (CPS), 5G und beyond 5G (B5G)).

**PhySec:** Die Realisierung der Zukunftsvision des Internet-der-Dinge und der Industrie 4.0, in der sehr viele heterogene Geräte, Aktoren und Sensoren, zuverlässig und sicher kommunizieren werden, benötigt eine neue Sicherheitsarchitektur, die skaliert und infrastrukturlos funktioniert. Physikalische Parameter aus der verwendeten Hardware und des Übertragungskanal erlauben die Entwicklung von neuen informationstheoretisch sicheren Primitiven. Wir erforschen die sichere Übertragung über unzuverlässige und unbekannte drahtlose Kanäle, über optische Multimode-Glasfaser-Kanäle mit Abhörern und über zustandsabhängige Kanäle mit aktiven Angreifern.

**CelCom:** Der Bereich umfasst sowohl aktuelle Mobilfunksysteme der 4. (LTE/A) und der 5. (5G, NR) als auch zukünftiger Generationen. Die Analyse und der Entwurf von neuen Übertragungsverfahren (PHY+MAC) beinhaltet die Kanalcodierung und -decodierung, die Signalverarbeitung am Sender und Empfänger (oder Relay) sowie neue Algorithmen der Ressourcen-Allokation, des Scheduling und der Zugangsverfahren. Gerade die Flexibilität durch Software-Defined Networks erlaubt eine effiziente Ressourcenvergabe und robuste und resiliente Kommunikation. Wir entwickeln neue Algorithmen zur Ressourcenvergabe und Sendestrategieoptimierung in zeitvarianten dynamischen komplexen Interferenznetzwerken.

**Wi-Fi:** In Zukunft werden immer dichtere private drahtlose lokale Netzwerke entstehen, die interferenzbegrenzt und unkoordiniert (alternativ zu managed Wi-Fi) das unlicenzierte Spektrum belegen. Zusätzlich erhöhen sich die Daten-

raten durch die große Anzahl an drahtlosen Geräten und durch Offloading von Makro-Mobilfunkzellen. Deshalb werden neue Verfahren und Ansätze zum verteilten Interferenzmanagement benötigt. Zur Optimierung der Funkressourcen setzen wir Ansätze aus dem maschinellen Lernen ein. Neue Verfahren zur Kanalcodierung und -decodierung werden durch Autoencoder gefunden. Wir konzentrieren uns auf Wi-Fi-Netzwerke (IEEE 802.11), deren Modellierung, Analyse, Optimierung und den effizienten Entwurf und Betrieb sowie deren Koexistenz mit anderen, z.B. zellularen Netzwerken.

WBAN: Gerade in neuen medizinischen Anwendungen werden Sensoren (und Aktoren) am menschlichen Körper angebracht, die physikalische Messgrößen effizient erfassen und bei Bedarf an ein drahtloses Fusion-Center übermitteln müssen. Basierend auf IEEE 802.15-Standards werden neue Verfahren der verteilten Signalverarbeitung und Codierung benötigt, um die anfallenden Datenmengen mit geringen Latenzzeiten und mit wenig Energieverbrauch an die zentralen Knoten zu schicken. Wir beschäftigen uns mit der Signalverarbeitung und Kommunikation für drahtlose Körpernetzwerke und der Anwendung des maschinellen Lernens (statistische Signalverarbeitung und Lernen) zur Signalrekonstruktion durch Entfernen von störenden Artefakten.

## **2. Projekte**

Erfreulicherweise konnten fünf Forschungsprojekte, die von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert werden, an die TU Braunschweig transferiert werden. Vier dieser fünf laufenden Projekte werden mit Kooperationspartnern durchgeführt. Im Berichtszeitraum sind bzw. waren wir in den folgenden internationalen und nationalen Forschungsvorhaben engagiert:

### **2.1 Internationale Projekte**

In einem DFG-Projekt mit dem Titel „Effiziente Ressourcenvergabe in drahtlosen Software-Defined Networks“ arbeiten wir mit Professor Nader Mokari von der Tarbiat Modares Universität in Teheran, Iran, gemeinsam an neuen Optimierungsverfahren für die effiziente Ressourcenvergabe in drahtlosen Interferenznetzwerken. Das Projekt hat bereits zu einer Veröffentlichung in den IEEE Transactions on Mobile Computing [REZ/JOR1] geführt. Ein gemeinsamer Workshop mit den beteiligten Projektleitern und Wissenschaftlern ist geplant.

## **2.2 Nationale Projekte**

Im DFG-Projekt „Physical Layer Security for Channels with State and Active Eavesdroppers“ wird gemeinsam mit Professor Holger Boche von der TU München an den grundlegenden Grenzen der sicheren Übertragung über Compound- und zufällig-variiere Kanäle mit aktiven und passiven Angreifern geforscht. Diese Kanalmodelle entsprechen einem schnellen Schwundkanal und einem Kanal mit einem Angreifer, der die Signalübertragung bewusst stört (Jammer). Ein weiteres DFG-Projekt aus dem Bereich PhySec ist ein Gemeinschaftsprojekt mit Professor Jürgen Czarske von der TU Dresden und heißt „Informationssicherheit auf der Übertragungsschicht in Multimode-Glasfaser-Kommunikationssystemen“. Das Ziel des Projektes ist eine sichere Übertragung über eine abgehörte Multimode-Glasfaser-Verbindung. Das dritte DFG-Projekt aus dem PhySec-Bereich „Signalverarbeitung am Kanaleingang für sichere Übertragungen über Fast-Fading-Kanäle mit statistischer Kanalkennntnis am Sender“ wird von Dr. Pin-Hsun Lin geleitet und beschäftigt sich mit neuen Signalförm und Vor-Codierung für sichere Übertragung über schnelle Schwundkanäle. Schließlich beschäftigt sich das DFG-Projekt „Robuste Rekonstruktion für drahtlose Body Area Sensor Netzwerke“, das in Zusammenarbeit mit Dr. Waltenegus Dargie von der TU Dresden durchgeführt wird, mit der Rekonstruktion von Zeitsignalen, die am Körper verteilt gemessen und über ein WBAN übertragen werden.

## **3. Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Abteilung**

Seit August 2019 sind vier Wissenschaftliche Mitarbeiter in der Abteilung beschäftigt. Die Forschungsgebiete der informationstheoretisch sicheren Übertragung über Abhörerkanäle wird von Dr. Pin-Hsun Lin, Carsten Janda und Andrew Lonnstrom bearbeitet. Herr Karl-Ludwig Besser arbeitet zum einen an Machine-Learning-Algorithmen zur Optimierung der Kanalcodierung und -decodierung, zum anderen an statistischen Signalverarbeitungsverfahren für die bessere Detektion und Rekonstruktion von Zeitsignalen. Im gemeinsamen DFG-Projekt mit dem iranischen Partner wurde Herr Sepehr Rezvani Ende Oktober bei uns eingestellt und wird seine Arbeit an der TU Braunschweig als Wissenschaftlicher Mitarbeiter fortsetzen.

## **4. Sicherheit auf der Übertragungsschicht (PhySec)**

Im Folgenden bieten wir einen knappen Überblick über die Forschungsaktivitäten in den oben genannten Bereichen. Dieses Jahr konzentrieren wir uns auf die Sicherheit auf der Übertragungsschicht (PhySec) und die zellulare Kommunikation (CelCom).



#### 4.1 Sichere Übertragung über zustandsabhängige Kanäle und aktiven und passiven Abhörern

Aktuell rücken informationstheoretische Sicherheitsansätze als Ergänzung zu kryptografischen Techniken immer mehr in den Fokus. Unter Berücksichtigung der physikalischen Eigenschaften des Übertragungsmediums ermöglichen sie eine gemeinsame Implementierung sowohl zuverlässiger als auch sicherer Kommunikation auf dem Physical Layer. Dieses Forschungsgebiet bietet vielversprechende Ansätze, um unbedingte Sicherheit zu erreichen und sichere Übertragungsverfahren in kabellose Netzwerke einzubetten. Bisher wurde in den Untersuchungen perfekte Kanalkenntnis bei allen Kommunikationsteilnehmern vorausgesetzt. In praktischen Systemen ist jedoch wegen kabelloser Kommunikation und Ungenauigkeit die Kanalzustandsinformation nur begrenzt verfügbar. Um kabellose Systeme resilient gegen natürliche Fehler oder durch einen Angreifer induzierte Attacken zu entwickeln, sind der Compound Channel (CC) und der Arbitrarily Varying Channel (AVC) die richtigen Systemmodelle. Dabei bleibt im CC-Modell der Kanalzustand während der Übertragung eines gesamten Codeblocks konstant, während sich bei dem AVC-Modell der Kanalzustand bei jeder Kanalbenutzung beliebig ändern kann. Dies modelliert nahezu beliebige Attacken.

Unser Ziel ist es, fundamentale Eigenschaften des Compound Wiretap Channels und des Arbitrarily Varying Wiretap Channels mit aktivem Angreifer, der auf bösartige Weise den Kanalzustand beeinflusst, zu verstehen. Für die Entwicklung von Systemen ist es wichtig, Beschränkungen der Möglichkeiten des Senders als auch des Angreifers richtig zu modellieren. In der Tat ist man an Ansätzen interessiert, die verhindern, dass kleine Veränderungen bezüglich des Kanalzustands in großen Verlusten der Performanz, also der Sicherheitskapazität, resultieren. Dieses ist insbesondere im Kontext eines aktiven Angreifers, der auf eine beliebige Art und Weise den Kanalzustand beeinflussen kann, wünschenswert. Wir entwickeln informationstheoretische Ansätze basierend auf allgemeinen Kanalmodellen, um Attacken auf Kommunikationssysteme mit eingebetteter Sicherheit zu modellieren.

In diesem Zusammenhang wird ein Arbitrarily Varying Wiretap Channel (AVWC) mit nichtkausaler Kenntnis des Kanalinputs beim Jammer untersucht. Es konnte ein Codierungstheorem entwickelt und eine Multi-Letter-Formel zur Berechnung der Sicherheitskapazität bestimmt werden. Dazu wurde die Existenz eines Kanals, der die Information zum Abhörer maximiert, angenommen. Für den stark degradierten Fall konnte eine Single-Letter-Formel zur Berechnung der Sicherheitskapazität bestimmt werden. Die Ergebnisse sollen sowohl bei einer Zeitschrift als auch in Auszügen bei der ISIT 2020 (International Symposium on Information Theory) eingereicht werden.

## 4.2 Machine Learning für den Entwurf sicherer Kanalcodes

In industriellen Anwendungen kommunizieren immer mehr Maschinen drahtlos und zur selben Zeit, wobei gleichzeitig steigende Anforderungen an Zuverlässigkeit, Latenz und Vertraulichkeit entstehen. Aus der Informationstheorie ist bekannt, dass Wiretap Codes asymptotisch Zuverlässigkeit erreichen können (verschwindende Fehlerrate (block error rate – BLER) beim legitimen Empfänger Bob) und gleichzeitig Geheimhaltung erreichen (verschwindender Informationsverlust (information leakage – IL) zu einem Abhörer Eve). Bei Verwendung einer endlichen Blocklänge gibt es jedoch einen Kompromiss zwischen der Fehlerwahrscheinlichkeit bei Bob und dem Informationsverlust zu Eve. In unserer Arbeit [BES/JAND/LIN/JOR1] stellen wir ein flexibles Wiretap-Code-Design für degradierte Gaußsche Wiretap-Kanäle unter endlicher Blocklänge vor, mit welchem man den Betriebspunkt an der Pareto-Grenze zwischen BLER und IL verschieben kann. Um dies zu erreichen, formulieren wir ein Optimierungsproblem mit mehreren Zielfunktionen, das sowohl die Zuverlässigkeit zu Bob als auch den Informationsverlust zu Eve berücksichtigt. Dabei wird die BLER durch den mittleren quadratischen Fehler und der IL durch Schemata, die auf Jensens Ungleichung und der Taylor-Entwicklung basieren, angenähert. Das Optimierungsproblem wird dann durch neuronale Netzwerke in Form eines Autoencoders gelöst. Simulationsergebnisse zeigen, dass das vorgeschlagene Verfahren Codes finden kann, die polare Wiretap-Codes in Bezug auf BLER und IL gleichzeitig übertreffen. Wir zeigen außerdem, dass die von den Autoencodern gefundenen Codes mit realen Modulationsverfahren mit nur geringen Verlusten implementiert werden können.

## 4.3 Optimale Eingangssignale für sichere Datenübertragung

Wir gehen die fundamentalen Herausforderungen für den ganzheitlichen Entwurf von sicheren Übertragungssystemen für schnelle Abhör-Schwundkanäle mit statistischer Kanalinformation am Sender (channel state information at the transmitter – CSIT) an. Der Ansatz konzentriert sich auf den Kanaleingang und beinhaltet zwei Teile:

1. Entwurf der Eingangsverteilung der Sendesignale und des künstlichen Rauschens
2. Entwurf der sicheren Kanalcodierung.

Die betrachtete Kanalinformation kann einfach a priori offline Indoor oder Outdoor gesammelt werden oder von vorherigen Übertragungen bekannt sein. Falls Alice senden möchte, kann sie die statistische Kanalinformation zwischen ihr und dem nächstgelegenen Teilnehmer ausnutzen, um den Abhör-Code für den schlimmsten Fall zu entwickeln. Dadurch gelingt es, die unrealistische Annah-

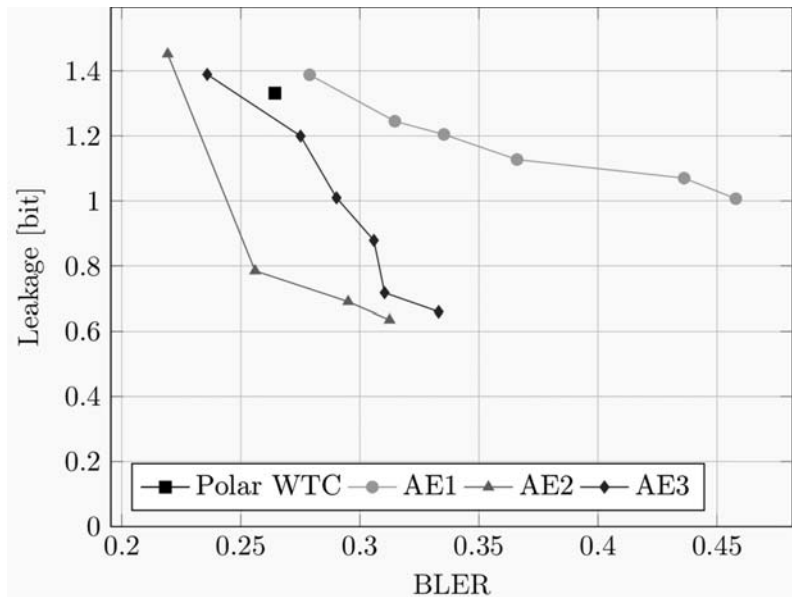


Abbildung 7: Informationsverlust über Fehlerrate für den Polar Wiretap Code (Stand der Technik) und den mit neuronalen Netzwerken mit verschiedenen Hyperparametern gefundenen Codes

me perfekter Kanalinformation fallen zu lassen. Die optimalen Eingangssignale für das Szenario sind im Allgemeinen nicht bekannt, bekannt sind sie nur für wenige spezielle Annahmen. Optimale Sendestrategien und der effiziente Codeentwurf sind ebenfalls unbekannt. In diesem Projekt werden eben solche Fragen Schritt-für-Schritt beantwortet und dabei die Signalisierung und Codierung entwickelt.

Um die Sicherheitsrate zu verbessern, wenn keine perfekte Kanalinformation zu Eve, der Abhörerin, vorliegt, wird für gewöhnlich künstliches Rauschen (artificial noise – AN) verwendet. In den gängigen AN-Verfahren werden drei Faktoren gradlinig bestimmt: 1) Der zeitliche Ablauf: In den meisten Fällen wird AN in schnellen Schwundkanälen mit unvollständiger Kanalkenntnis eingeführt. 2) Die Richtung des AN: AN wird in die orthogonale Richtung (dem sogenannten Nullraum) zu Bobs Kanal gesendet, um Interferenz am legitimierten Empfänger zu vermeiden. 3) Die Eingangsverteilung des Nachrichten- und AN-Signals: Diese beiden Signale werden als Gauß-verteilt zum Rechnen angenommen. Al-

lerdings ist diese Wahl nicht nur suboptimal, sondern behindert auch die grundlegende Charakterisierung des Prefixings für nicht-degradierte Abhörkanäle. Wir untersuchen den ersten und dritten Faktor. Für den ersten leiten wir notwendige und hinreichende Bedingungen für AN her. Für den dritten entwerfen wir Signalverteilungen. Außerdem entwickeln wir Polar Codes für Abhörkanäle mit statistischer CSIT. Ein Beispiel ist in **Abbildung 7** dargestellt. Auf der X-Achse wird die Blockfehlerrate am gewünschten Empfänger aufgetragen, während auf der Y-Achse der Informationsverlust an den Abhörer aufgetragen wird. Der Stand der Technik ist ein Polar Wiretap Code. Unser Autoencoder Algorithmus kann bei geeigneter Wahl der Hyperparameter (hier mit AE1, AE2 und AE3 betitelt) Arbeitspunkte erreichen, die geringere Fehlerrate und weniger Informationsverlust erreichen.

Zusammenfassend ist das Forschungsziel des Projekts ein vollständiger Entwurf der Eingangssignale für Abhörkanäle mit statistischer CSIT, der bisher ungelöst ist. Durch die Annahme dieser Herausforderungen führen wir Methoden der Wahrscheinlichkeitstheorie in den Werkzeugkasten der Nachrichtentechnik, z.B. stochastische Ordnungen, ein. Diese werden verwendet, um ein Rahmenwerk für die Ressourcen-Vergabe in Mehrnutzer-Netzwerken mit imperfekter CSIT zu erzeugen.

Derzeit betrachten wir den binären Fading-Interferenzkanal mit statistischer CSIT. Es ist eine Fortsetzung einer früheren Arbeit über die Kapazitäten von Mehrbenutzerkanälen im Rahmen der statistischen CSIT, die in [LIN/JOR/JAND1], [LIN/JOR/JAND2] vorgestellt wurde. Außerdem haben wir den Zusammenhang zwischen Geheimhaltung und Datenschutz untersucht [JOR5]. Die Ergebnisse wurden noch im Dezember auf dem Workshop for Information Security (WIFS) 2019 vorgestellt.

Ein weiterer Ansatz zur Generierung von sicheren drahtlosen Verbindungen durch Ausnutzen der Parameter der Übertragungsschicht ist die Erzeugung von sicheren Schlüsselpaaren durch reziproke Kanalparameter. Hier werden in beiden Richtungen schnelle Kanalschätzungen durchgeführt und anschließend durch ein Protokoll ein gemeinsamer Schlüssel erzeugt. In [JOR6] wird ein Überblick über die Möglichkeiten dieser sicheren Schlüsselerzeugung für 5G und nachfolgende Netzwerktechnologien gegeben. Die speziellen Eigenschaften der massive MIMO- und mmWave-Systeme haben einen signifikanten Einfluss auf die erreichbaren sicheren Schlüsselraten.

Schließlich beschäftigt sich die Arbeit in [LIN/JOR1] mit erreichbaren Sicherheitsraten und sicheren Schlüsselraten in Mehrantennen-Mehrbenutzersystemen, die sowohl eine hohe Energieeffizienz als auch eine vertrauliche Übertragung unterstützen.

#### 4.4 Sichere Übertragung über Multimode-Glasfaser-Kanäle

Optische Netzwerke sind das Rückgrat unserer Informations- und Kommunikationsgesellschaft und haben sich von einem Single-Mode-System mit Datenraten von Megabit pro Sekunde zu einem Multi-Terabit-System entwickelt. Der Datenverkehr umfasst nicht nur Benutzerdaten, sondern auch unternehmenskritische Kommunikationsdienste, die empfindlich auf Abhör- und Störungsangriffe reagieren. Wir untersuchen die grundlegenden Grenzen physikalischer Layer-Sicherheitstechniken für die Datenübertragung durch optische Multimode-Fasern (MMF), sowohl theoretisch als auch experimentell. Basierend auf der gemessenen Übertragung werden charakteristische Kanalmodelle entwickelt und die informationstheoretischen Grenzen der abgegriffenen Glasfaserkanäle abgeleitet und analysiert. Verschiedene Vorcodierungs- und Modulationstechniken werden vorgeschlagen, um die Geheimhaltungsleistung in verschiedenen Angreiferszenarien zu verbessern.

Wir haben dieses Jahr einen ersten Zeitschriftenaufsatz eingereicht, bei dem die inverse Vorcodierung, wie sie auf MMF mit einem Spatial Light Modulator (SLM) angewendet wird, durchgeführt wurde. Auf Basis der gemessenen Übertragungsmatrix wurde dann nach inverser Vorcodierung eine Geheimhaltungsanalyse durchgeführt. In **Abbildung 8** werden gemessene Kanalmatrizen eines MMF-Kanals gezeigt. Oben ohne und unten mit Anwendung der inversen Vorcodierung. Ziel ist es, eine Diagonalmatrix mit Einsen auf der Diagonale zu erzeugen. Darüber hinaus wird derzeit im Bereich Machine Learning und dessen Anwendung auf Wiretap Codes speziell für einen multimodalen Faserkanal geforscht. Die Ergebnisse werden in einer Sondersitzung zum Thema Machine Learning und Physical Layer Security nächstes Jahr 2020 vorgestellt.

#### 5. Zellulare Kommunikationssysteme (CelCom)

Zellulare Kommunikationstechnologien dominieren unser heutiges Leben und das Interesse an Bandbreite scheint keine Grenzen zu kennen. Drahtlose Systeme der zweiten Generation bis zur vierten Generation heute, wurden entwickelt, um Teilnehmern drahtlose Verbindungen und hohe Datenraten anzubieten. Dieser Trend setzt sich in der 5. Mobilfunkgeneration fort. 5G beinhaltet aber auch neue Ziel-Merkmale, wie sehr hohe Verfügbarkeit und geringe Latenz, und adressiert neue Anwendungen, wie Maschinen-Kommunikation, welche diese Eigenschaften anfordern.

In diesem Kontext hat die International Telecommunication Union (ITU) drei 5G-Szenarien definiert: enhanced mobile broadband, massive machine-type communication (mMTC) und ultra-reliable low-latency communication (URLLC). Es sollen nun gleichzeitig verschiedene Anwendungen und Dienste in diesen Szenarien

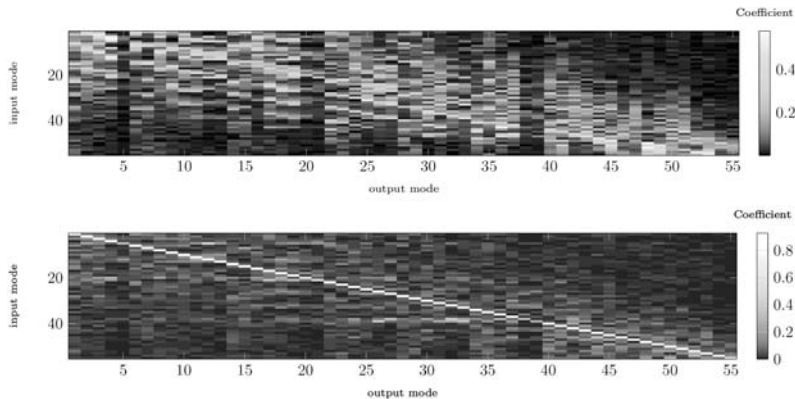


Abbildung 8: Transmissionmatrixmessungen des MMF-Kanals vor (oben) und nach (unten) der Anwendung der inversen Vorcodierung mit einem SLM. Auf der Y-Achse sind die 52 Eingangsmoden und auf der X-Achse die 52 Ausgangsmoden aufgetragen. Der 'Coefficient' gibt die Dämpfung beim Übersprechen von einer Eingangs- auf eine Ausgangsmoden an und liegt zwischen Null und Eins.

rien unterstützt werden. Deshalb ergeben sich neben der Erhöhung der Datenraten weitere neue Herausforderungen.

Um diese Anforderungen an Zuverlässigkeit für URLLC-Dienste zu erfüllen, können verschiedene Technologien eingesetzt werden. Durch Mehrwegeausbreitung und Mobilität zeigt der Übertragungskanal einen zeit- und frequenzvarianten Schwund (fading), der die Qualität und Zuverlässigkeit eines Links stark beeinträchtigt. Ein anderer wesentlicher limitierender Faktor ist die Interferenz und Begrenztheit der Funk-Ressourcen. Zur Beseitigung der Fading-Einflüsse und Erhöhung der Zuverlässigkeit werden Diversitätsverfahren eingesetzt, d.h., die Daten werden über verschiedene Wege vom Sender zum Empfänger transportiert und damit die Wahrscheinlichkeit, dass wenigstens ein Weg zuverlässig ist, erhöht. Die Idee wird auch in der Finanzwelt verwendet, um ein Aktienportfolio zu optimieren: Die Aktien sollen möglichst divers sein, damit das Portfolio robust gegenüber negativer Entwicklung an einem Markt ist. Man wählt dazu möglichst unabhängige Komponenten, z.B. Technologieaktien, Rohstoffe, Tourismusaktien oder Immobilien. Fällt der Aktienkurs in einem Markt, ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein anderer unabhängiger Markt stabil bleibt, groß.

In der Mobilkommunikation gibt es (mindestens) die folgenden Diversitätsarten: zeitliche, spektrale, räumliche und Mehr-Teilnehmer-Diversität. Diversitätsver-

fahren, die eine oder mehrere dieser Formen ausnutzen, sind bereits seit der 3. Mobilfunkgeneration im Einsatz. Seit LTE wird auch Dual- und in 5G Multi-Konnektivität unterstützt, bei dem gleichzeitig Verbindungen zu verschiedenen Zugangspunkten mit verschiedenen Technologien aufgebaut werden: eine LTE-Hauptverbindung zur ersten Basisstation und eine weitere 5G NR (new radio)-Verbindung zu einer weiteren Basisstation. Damit können zum einen die Ausfallsicherheit und zum anderen die Datenraten erhöht werden. Es eröffnet sich eine Vielzahl von neuen Möglichkeiten und Herausforderungen für die Ressourcen-Vergabe und die Zuweisung von Zugangsknoten zu Endgeräten. Die Konflikte zwischen den Anforderungen der Endgeräte führen zu interessanten gekoppelten multikriteriellen Optimierungsproblemen. In den folgenden beiden Abschnitten werden zwei Forschungsarbeiten aus der Abteilung für dieses Aufgabenfeld vorgestellt.

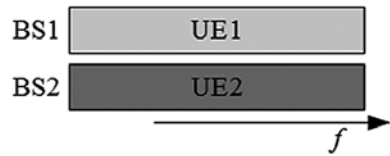
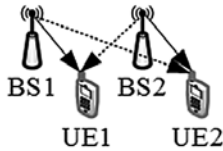
## 5.1 Multi-Connectivity für Ultra-Zuverlässigkeit

Der wesentliche erste Schritt in der Informationstheorie besteht darin, das Systemmodell so zu vereinfachen, dass die unwesentlichen Details abstrahiert werden, aber der Kern der Fragestellung herausgearbeitet wird. Deshalb stellen wir uns ein mehrzelliges Mehrteilnehmer-Netzwerk vor, in dem jedes Endgerät (user equipment – UE) zu jeder Basisstation (BS) zugewiesen werden kann, solange eine minimale Bedingung bezüglich der Empfangsleistung oder Distanz erfüllt ist. Außerdem kann sich jedes UE mit mehreren BS verbinden, die auf derselben Frequenz zur gleichen Zeit arbeiten. Einige Optionen der Verbindung sind für zwei UE und zwei BS exemplarisch in **Abbildung 9** dargestellt.

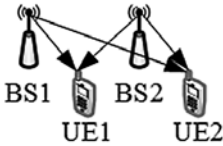
Verbindungsoption 1: Jedes UE ist mit genau einer BS verbunden. Die gesamte Bandbreite wird jedem UE zur Verfügung gestellt. Allerdings wird so auch die volle Interferenz der benachbarten BS empfangen. Verbindungsoption 2: Beide UE verbinden sich mit beiden BS, aber erhalten exklusiv die Hälfte der verfügbaren Bandbreite. Die Interferenz wird signifikant verringert. Aber beide UE erhalten auch deutlich weniger Bandbreite, nämlich die Hälfte. Verbindungsoption 3: In diesem asymmetrischen Fall verbindet sich UE1 mit beiden BS, während UE2 nur eine Verbindung mit BS1 erhält. UE1 verwendet den ersten Teil des Spektrums exklusiv, der zweite Teil wird von BS1-UE2 und BS2-UE1 gleichzeitig verwendet. So ist es möglich, unterschiedliche Dienste für UE1 und UE2 anzubieten.

In [JOR2] untersuchen wir verschiedene Verbindungsansätze: einfache, duale und mehrfache unter verschiedenen Lastsituationen und verschiedener Anzahl von BS. Es wird ein Ansatz zur Zuweisung von UE zu BS vorgeschlagen, der auf einem Matching-Markt basiert. Ein neuer Scheduling-Algorithmus wird entwi-

### Option 1



### Option 2



### Option 3

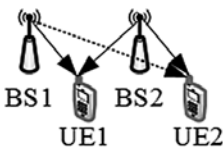


Abbildung 9: Abbildung 1 aus [JORS2]: Beispiel-Optionen der Verbindung zwischen zwei BS und zwei UE. Durchgezogene Linien sind die gewünschten Verbindungen, gestrichelte Linien sind nicht gewünschte, interferierende Verbindungen

ckelt, der die Unterbänder fair auf die UE verteilt. Die Performanz wird anhand von umfangreichen Systemlevel-Simulationen gezeigt.

Die grundlegende Idee der Mehrfach-Verbindung besteht darin, die Wahrscheinlichkeit zu maximieren, dass wenigstens eine Verbindung ausreicht, um die Dienstgüteanforderungen zu erfüllen. Wie im Beispiel mit dem Aktien-Portfolio versucht der Scheduler, möglichst unabhängige Verbindungen aufzubauen. Die zugrundeliegende gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung der Schwundkanäle spielt die entscheidende Rolle [JOR/LIN1]: Sind die beiden Kanäle vollständig korreliert, bringt die gemeinsame Verbindung keinen Diversitätsgewinn. Sind die beiden Kanäle vollständig negativ korreliert, bringen sie den größten Gewinn hinsichtlich der Ausfallwahrscheinlichkeit. Wir konnten in [JOR/LIN1] zeigen, dass mit negativ abhängigen Mehrfach-Verbindungen die Ausfallwahrscheinlichkeit auf identisch Null gebracht werden kann. So kann eine ultra-zuverlässige Verbindung ermöglicht werden. Die zugrundeliegende Methodik basiert auf Schranken für die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung.



lung, die auch durch Copula modelliert werden können. Die Copula-Theorie wird in der Finanzmathematik zur Portfolio-Optimierung eingesetzt.

## 5.2 Effiziente globale Ressourcen-Allokation in nicht-orthogonalen Interferenz-Netzwerken

Sehr entscheidend für den Erfolg einer neuen Technologie ist, dass die Leistungsfähigkeit unter optimaler Verwendung derselben deutlich bessere Performanz erzielt als der Stand der Technik. Daher ist es von fundamentaler Bedeutung, nach der Systemmodellierung ein klares Optimierungsproblem für den Systementwurf zu formulieren. Häufig sind diese Optimierungsprobleme allerdings sehr schwer zu lösen, weil die Zielfunktion zwar stetig, aber nicht konvex ist, oder die Nebenbedingungen zu einer nicht konvexen Menge führen. Die Algorithmen, die zur Lösung der Optimierungsprobleme gefunden werden, sollen auf der einen Seite nicht zu komplex sein, damit eine Online-Optimierung im laufenden Betrieb des Systems möglich ist, zum anderen aber auch eine sehr gute Performanz zeigen. Deshalb ist es notwendig zu wissen, wie weit die Eigenschaften der entwickelten Algorithmen von der global optimalen Leistungsfähigkeit entfernt liegen. Dieser Aufgabe widmen sich eine Reihe von aktuellen Arbeiten in der Abteilung. In [JOR9], [JOR13], [JOR11] entwickeln wir neue Ansätze zur effizienten Lösung von globalen Optimierungsproblemen der Ressourcen-Vergabe in Interferenznetzwerken. Das klingt zunächst widersprüchlich, weil globale Optimierungsprobleme in der Regel exponentielle Komplexität in der Anzahl der Variablen aufweisen und entsprechend der Speicherbedarf ebenfalls steigt, aber unsere Optimierungsprobleme weisen Eigenschaften bezüglich der Monotonie und Konvexität auf, die ausgenutzt werden können, um selbst nicht-konvexe Probleme etwas effizienter und mit weniger Speicherbedarf zu lösen.

Ein Beispiel für eine nicht-konvexe Zielfunktion ist die Energieeffizienz eines Übertragungssystems. Diese Funktion ist quasi-konkav, hat ein globales Maximum, ist davor monoton steigend und danach monoton fallend, sowie abwechselnd konvex und konkav. Für ein bestimmtes Systemmodell, nämlich den Mehrwege-Relay-Kanal, konnten wir in [JOR11] die Energieeffizienz für drei Übertragungsverfahren maximieren: Simultaneous non-unique decoding (SND), traditionelles SND, sowie treating interference as noise (IAN).

Vor der Entwicklung unserer neuen Optimierungsverfahren war ein Vergleich dieser drei nur sehr schwer möglich – dazu sind in **Tabelle 1** die Laufzeiten im Stand der Technik (Dinkelbach) mit dem vorgeschlagenen Verfahren (Mosek und Gurobi-basiert) verglichen. Eine Effizienzsteigerung um den Faktor drei bis fünf ist erkennbar.

		SNR		
		0 dB	20 dB	40 dB
Gurobi	Mean	5.1438 s	0.1771 s	0.155 s
	Median	3.2781 s	0.0762 s	0.06 s
Mosek	Mean	15.0453 s	0.1368 s	0.0323 s
	Median	10.2756 s	0.0219 s	0.019 s
Dinkelbach	Mean	377.1501 s	145.4181 s	36.969 s
	Median	162.811 s	23.027 s	16.9229 s

Tabelle 1: Mittelwert und Median der Laufzeiten der Energieeffizienz-Optimierung für traditionelles SND mit einer Präzision von 0.01

In **Abbildung 10** kann man erkennen, dass für eine Energieeffizienzoptimierung beide Verfahren, SND und IAN, dieselbe Leistungsfähigkeit zeigen. Das traditionelle SND hat eine deutlich geringere Energieeffizienz.

In einem anderen Anwendungsszenario [JOR4], nämlich einem Full-Duplex (FD) Device-to-Device (D2D) Netzwerk, in dem mehrere FD-D2D-Paare mit einem makrozellularen System koexistieren, wird ebenfalls die global optimale Lösung der Ressourcen-Allokation gesucht.

Das resultierende Optimierungsproblem ist wieder nicht-konvex und schwierig zu lösen. Wir schlagen deshalb eine Zerlegung in Teilprobleme vor, die nacheinander angegangen und gelöst werden. Die Zuteilung von D2D-Paaren zu Ressourcen und die anschließende Leistungskontrolle werden als Unterprobleme behandelt und gelöst. Die Zuweisung wird als bipartiter Graph dargestellt und durch den Khun-Munkres-Algorithmus (Hungarian Method) gelöst. Der äußere Polyblock-Algorithmus wird für die global optimale Leistungskontrolle verwendet. Dabei wird das Problem in ein monotonen Optimierungsproblem über eine normale Nebenbedingungsmenge überführt und dann der Rand der Nebenbedingungsmenge durch Polyblöcke approximiert. In [JOR4] wird auch ein suboptimaler, jedoch weniger komplexer Algorithmus entwickelt und mit der global optimalen Lösung verglichen.

### 5.3 Weitere Arbeiten zur Ressourcen-Verteilung in zellularen Netzwerken

In [JOR1] werden Scheduling- und Ressourcen-Verteilungsalgorithmen für Non-orthogonal Multiple Access (NOMA) Systeme betrachtet. Die gleichzeitige Mini-

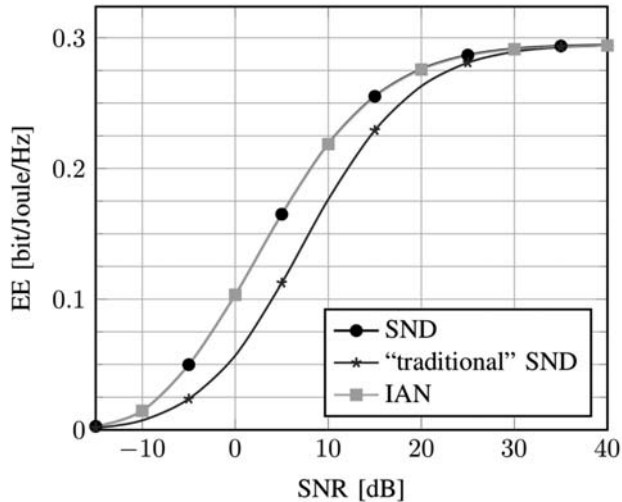


Abbildung 10: Energieeffizienz des Mehrwege-Relais-Kanals mit Amplify-and-forward relaying und 1) SND, 2) traditionellem SND, 3) IAN mit einer Präzision von 0.01

mierung der Verzögerungen bei der Datenzustellung und die Maximierung der Datenraten erfordert neue Algorithmen. Die geringen Latenzzeiten der Dienste für 5G- und zukünftige Netze werden auch in [JOR12] untersucht. Erreichbare Raten für Codes mit endlichen (kurzen) Blocklängen werden für Full-Duplex-Relais-Systeme optimiert. Die garantierte Dienstgüte in Relais-Netzwerken ist auch das Optimierungsziel der Arbeit [JOR3]. Die Energieeffizienz ist wichtigster Performance-Indikator in [JOR7]. Schließlich schlagen wir in [JOR10] vor, Techniken des maschinellen Lernens zu verwenden, um die Ressourcen-Verteilung in drahtlosen Interferenznetzwerken effizient zu lösen.

# **Abteilung Signalverarbeitung und Machine Learning (Fingscheidt)**

## **1. Forschungsfelder der Abteilung**

Die Abteilung Signalverarbeitung und Machine Learning arbeitet mit Methoden des Deep Learning in den Forschungsfeldern Sprachverarbeitung und Computer Vision.

Im Bereich der Sprachverarbeitung erforschen wir Verfahren zur Störgeräuschreduktion, akustischen Echokompensation, künstlichen Sprach-Bandbreitenerweiterung, In-Car-Kommunikationssysteme sowie Strategien zum Training neuronaler Netze zu allen vorgenannten Algorithmen. Weitere Themen sind Beamforming sowie (neuronale) Nachfilter für höherqualitative, aber standardkonforme Sprach- und Audiodecoder. Darüber hinaus befassen wir uns mit Emotionserkennung, multikanaliger Sprachaktivitäts-Erkennung und akustischer Event-Erkennung sowie mit der automatischen Spracherkennung und Informationsfusion.

Im Bereich der Computer Vision forschen wir im Wesentlichen an Perzeptionsmethoden für das autonome Fahren. Dazu gehören semantische Segmentierung, Tiefenschätzung, gelernte Bildkompression, Corner-Case-Detektion sowie Fragestellungen des Domain Transfers und adversarialer Angriffe.

Wir arbeiten im Kontext von Fahrzeug-, Office- und Consumer-Anwendungen im Bereich von Smartphones, Hörgeräten/Cochlea-Implantaten, Freisprechsystemen, Überwachungs- bzw. Produktionstechnologien bis hin zum autonomen Fahren.

## **2. Projekte**

Unsere erfolgreichen Forschungsarbeiten im Bereich der iterativen Turbo-Informationsfusion in der automatischen Spracherkennung werden seit diesem Berichtsjahr von der DFG durch eine Sachbeihilfe gefördert (DFG-Kennzeichen FI 1494/6-1). Im Rahmen dieser zweijährigen DFG-Einzelförderung sollen weitere Möglichkeiten zur Informationsfusion untersucht werden und die Fusion von statistisch abhängigen Emissionen durch theoretische Analysen untersucht werden.

Das gut zweijährige Kooperationsprojekt MindMarker wurde zusammen mit der Firma Mind Intelligence UG, Berlin, beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) eingeworben und gestartet. Ziel des Projekts ist es, ein System zur Detektion von Depressionen anhand der Stimme eines Anrufers zu ent-

wickeln. Der Beitrag des IfN liegt in einer dafür notwendigen robusten Emotionserkennung.

In diesem Jahr startete das dreijährige Projekt KI-Absicherung, welches vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert wird. In diesem dreijährigen Förderprojekt werden Ansätze zur Erhöhung der Robustheit von Methoden der künstlichen Intelligenz gegenüber Veränderungen der Eingangswerte im Kontext des autonomen Fahrens erforscht. Das IfN ist über einen Unterauftrag der Volkswagen Group Innovation eingebunden.

Ebenfalls neu gestartet wurde ein mehrjähriges Kooperationsprojekt mit IAV GmbH zur KI-basierten, automatisierten Fehlergeräuscherkennung in der Fahrzeugdiagnose. Mit dem Schwerpunkt auf der Erkennung akustischer Events sollen dabei fehlerhafte Zustände eines Fahrzeugs durch Machine-Learning-Methoden basierend auf akustischen Sensoren (z.B. Freisprechmikrofone) detektiert und klassifiziert werden.

In einer einjährigen Vertikalstudie, beauftragt von der Volkswagen Group Innovation, wurden Teacher-Student-Netzwerke wie auch neuartige Netztopologien und Netzkonfigurationen auf ihre Möglichkeiten zur Erhöhung der Robustheit gegenüber adversarialen Angriffen erforscht.

Das mit der Volkswagen Group Innovation weitergeführte Kooperationsprojekt zu sog. generativen adversarialen Netzwerken (GANs) im automatischen Fahren thematisierte wie schon im Vorjahr gelernte Bildkompressionsverfahren. Es wurden verschiedene Methoden zur Perzeption mit verteilten Sensornetzwerken, Datenübertragung im Vehicle-to-anywhere (V2X)-Kontext und zur generellen Effizienzsteigerung z.B. durch Vektorquantisierung entwickelt.

Weitergeführt wurden – ebenfalls in Kooperation mit der Volkswagen Group Innovation – unsere methodischen Ansätze zur Corner-Case-Detektion. Dabei handelt es sich um Online- und Offline-Ansätze zum Auffinden von kurzen Bildsequenzen, bei denen kritische bzw. seltene Ereignisse in einem Verkehrsszenario zu sehen sind. Neben der Entwicklung eines Frontends und eines Tools sind grundlegende Arbeiten zum Domain Transfer gelungen, damit das Tool auf unterschiedlichen Datenbanken lauffähig ist.

In einem Förderprojekt des Landes Niedersachsen (NBank) arbeiteten wir nun im zweiten Jahr gemeinsam mit der Firma Pan Acoustics GmbH aus Wolfenbüttel an einem drahtlosen Mikrofonarray. Nachdem im ersten Projektjahr maßgeblich adaptives Beamforming für das Mikrofonmodul im Fokus stand, lag der Fokus in diesem Projektjahr auf niedriger Verzögerungszeit für das Gesamtsystem und einer Soft-Audio-Decodierung für die Funkstrecke.

Mit der R&D-Gruppe der Firma NXP Semiconductors, Product Line Voice and Audio Solutions, Belgien, wurden im Berichtszeitraum Forschungsarbeiten zur Störgeräuschreduktion für Sprachsignale weitergeführt. Der Fokus des Vorhabens im Berichtsjahr lag auf der Erforschung mehrstufig aufgebauter Systeme basierend auf tiefen neuronalen Netzen sowie auf der Betrachtung verschiedener neuartiger Modelltopologien und Fehlerfunktionen für das Training der neuronalen Netze. Ein zweites Projekt in diesem Themenbereich wurde im Juli dieses Jahres aufgenommen. Ziel der Forschungsarbeiten ist es, die im ersten Projekt erarbeiteten Modelle im Hinblick auf Parameter und Rechenkomplexität zu reduzieren.

Zu einem erfolgreichen Abschluss geführt wurde im Berichtszeitraum das BMBF-geförderte Projekt „KI-Plattform-Konzept“. Gemeinsam mit zahlreichen renommierten Partnern aus Industrie und Forschungsinstitutionen wurde die Konzeptionierung einer nationalen institutionsübergreifenden Datenplattform für die Entwicklung von Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) beim Einsatz für das autonome Fahren erstellt, die in einem geplanten Nachfolgeprojekt implementiert und betrieben werden soll. Die Beiträge des IfN umfassten die automatische (Video-)Datenselektion, Bild- und Video-Kompression sowie Aspekte einer Audio-Datenakquisition.

Im Rahmen des Förderprogrammes Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) wurde im Berichtszeitraum das Projekt „Erkennung von Emotionen in akustischen Signalen“ mit der Firma eye square GmbH in Berlin erfolgreich abgeschlossen. Innerhalb des Projekts wurde ein Expertensystem zur echtzeitigen und dynamischen Beratung von Nutzern von Online-Handelsplattformen auf Basis der Analyse ihrer Präferenzen durch Verhaltensmuster und Erkennung von Emotionen in lautsprachlichen Äußerungen entwickelt.

Das auch vom BMWi geförderte ZIM-Projekt „HIFI-AEC“ mit der Firma Linguwerk GmbH in Dresden, in dessen Rahmen die Sprachbedienung bei HiFi- und Infotainment-Systemen durch eine am Institut für Nachrichtentechnik entwickelte akustische Echokompensation für Stereo-Signale aufgewertet wurde, ist ebenfalls erfolgreich abgeschlossen worden.

Weiterhin abgeschlossen wurde das vom BMBF unterstützte zweijährige Projekt zur Förderung von Qualifizierungsmaßnahmen und Forschungsvorhaben im Bereich Maschinelles Lernen im Rahmen des Förderprogramms „IKT 2020 – Forschung für Innovationen“. Im Berichtszeitraum hat das zweite *Deep Learning Lab* mit insgesamt 30 Studierenden stattgefunden. Insgesamt konnte die Qualität der Lehr- sowie der Abschlussveranstaltung gegenüber dem ersten Durchgang deutlich gesteigert werden. Ein Sonderbericht zu der Abschlussveranstal-

tung, die durch Sponsoren aus der Industrie unterstützt wurde, befindet sich auf Seite 128.

Eine vom China Scholarship Council (CSC) unterstützte Forschungsarbeit zur Sprachdecodierung mit verbesserter Qualität wurde zu Ende geführt. Die entwickelten maschinengelernten Verfahren können standardkompatibel deutliche Qualitätsverbesserung bei einer Vielzahl von Sprach(de)codierern erzielen.

Das vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur geförderte dreijährige Promotionsprogramm „Konfigurationen von Mensch, Maschine und Geschlecht – Interdisziplinäre Analysen zur Technikentwicklung“, kurz „KoM-Ma.G“, kam im Berichtszeitraum zu einem Ende. Vom IfN sind hier Arbeiten zum Thema Sprachverbesserung und Emotionserkennung für die automatische Sprachanalyse von Team-Meetings erfolgt.

### **3. Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Abteilung**

Das Forschungsfeld der Computer Vision ist aufgrund der Vielzahl KI-bezogener Projekte weiter auf Expansionskurs. Zu den bereits länger bei uns aktiven Herren Bär, Bolte und Löhdefink sind neu dazu gestoßen Marvin Klingner (seit 01.03.2019) und Jasmin Breitenstein (seit 01.10.2019). In der Sprachverarbeitung forschen weiterhin die Herren Elshamy, Franzen, Lohrenz, Meyer, Strake, Xu und Zhao. Ebenfalls neu an Bord ist Jan Baumann (seit 01.04.2019) im Bereich der Erkennung von akustischen Events. Damit arbeiteten zum Ende des Berichtszeitraums in der Abteilung Signalverarbeitung und Machine Learning neben Prof. Fingscheidt und Frau Erichsen-Rua 13 Wissenschaftler/innen mit. Bei der Volkswagen Group Innovation betreut Prof. Fingscheidt vier weitere Doktorand/innen im Forschungsfeld Vision: Antonia Breuer, Nikhil Kapoor, John Serin Varghese, Christopher Plachetka. Im Berichtszeitraum haben bei uns sieben Studierende eine Masterarbeit und drei Studierende eine Bachelorarbeit bzw. Projektarbeit abgeschlossen. Weiterhin hat uns noch eine Vielzahl studentischer Hilfskräfte unterstützt.

## **4. Sprachverbesserung**

### **4.1 Störgeräuschreduktion**

Algorithmen zur Störgeräuschreduktion sind notwendig, um gute und verständliche Telekommunikation zu ermöglichen, unabhängig vom Umfeld der Teilnehmer. Am Institut wird daher aktiv auf unterschiedlichen Ebenen an der Verbesserung solcher Verfahren geforscht. Ein wichtiger Bestandteil solcher Verfahren sind Gewichtungsfunktionen, die letztlich im Frequenzbereich das Störgeräusch

unterdrücken sollen. Diese können durch traditionelle Verfahren statistisch oder auch direkt durch moderne neuronale Netzwerke geschätzt werden.

Im Berichtszeitraum hat sich Herr Elshamy weiterhin mit der Schätzung der A-Priori-Signal-to-Noise Ratio (A-Priori-SNR) beschäftigt, welche ein wichtiger Bestandteil der traditionellen, statistischen Störgeräuschreduktion ist. Für die Schätzung des A-Priori-SNRs wurde hierbei zunächst das bereits bestehende Verfahren zur Manipulation des Sprachanregungssignals von 2017 durch den Einsatz von neuronalen Netzwerken deutlich verbessert. Die Ergebnisse wurden als Zeitschriftenaufsatz in der November-Ausgabe der IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing publiziert [ELS/FIN1]. Es wurden Untersuchungen zu unterschiedlichen Features sowie zur Normalisierung von Zielvektoren durchgeführt. Das Verfahren wurde anschließend in Kombination mit dem 2018 publizierten Ansatz zur Verbesserung der Sprach-Einhüllenden ausgewertet und konnte auch dort eine stark verbesserte Dämpfung des Störgeräusches erreichen, bei überwiegend gleichbleibender Qualität der Sprachkomponente.

Als Variante wurde eine weitere Version entwickelt, die die Qualität der Sprachkomponente besonders bei schlechtem SNR objektiv verbessert. Dies wurde erzielt bei gleichzeitiger Verbesserung der Dämpfung. Zusätzlich wurde ein subjektiver Hörtest durchgeführt, der zeigte, dass das neue Verfahren von den Hörern gegenüber einem traditionellen deutlich bevorzugt wird. Die Ergebnisse wurden auf dem IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA) in New Paltz, New York mit einem Posterbeitrag publiziert [ELS/FIN2].

Herr Xu entwickelte ein maskenbasiertes Sprachverbesserungs-Framework, bei dem identische tiefe neuronale Netze (Deep Neural Networks, DNNs) in Reihe miteinander verkettet werden (sog. Concatenated Identical DNNs, CI-DNNs). Die Idee ist, dass die Sprache durch identische DNNs stufenweise verbessert wird, um trainierbare Parameter zu sparen und auch ein Gleichgewicht zwischen Sprachkomponentenqualität und Rauschunterdrückung zu erreichen. Ein besonderes Ergebnis ist, dass nicht-stationäre Störgeräusche mit dieser Methode ein subjektiv angenehmes Restgeräusch ergeben. Die Ergebnisse wurden in einer Publikation auf der 2019 European Signal Processing Conference (EUSIPCO) vorgestellt [XU/STRA/FIN1].

Um während des Trainings von neuronalen Netzen zur maskenbasierten Sprachverbesserung die Erhaltung der Sprachkomponenten-Qualität, die Unterdrückung der Restrausch-Komponente und die Erhaltung einer natürlich klingenden Restrausch-Komponente voneinander getrennt zu kontrollieren, wurde ein neuartiger Komponentenfehler (engl. Component Loss, CL) vorgeschlagen. Die Ergebnisse dieser neuartigen Methode wurden in Form eines Zeitschriften-



artikels „Components Loss for Neural Networks in Mask-Based Speech Enhancement“ bei den IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing eingereicht und als arXiv-Preprint hochgeladen [XU/ELS/ZHA/FIN1].

Herr Zhao arbeitete an modernen subjektiv motivierten Fehlerfunktionen für neuronale Netze in der Sprachverbesserung. Um die menschliche Wahrnehmung in die Sprachverbesserung einzubeziehen, wird anstelle der herkömmlichen Fehlerfunktion, die den mittleren quadratischen Fehler minimiert, ein Wahrnehmungs-basiert gefiltertes Fehlersignal der Fehlerfunktion während des Trainings des neuronalen Netzwerks zugrunde gelegt. Die sich ergebende vorgeschlagene Fehlerfunktion wird durch ein aus der Sprachcodierung mit code-excited linear prediction (CELP) bekanntes Gewichtungsfiler motiviert. Die experimentellen Ergebnisse zeigten, dass die neue Fehlerfunktion in Bezug auf die Wahrnehmungsqualität der verbesserten Sprache eine bessere Leistung im Vergleich zur herkömmlichen Fehlerfunktion hat. Diese Arbeit wurde auf dem IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA) in New Paltz, New York [ZHA/ELS/FIN1] veröffentlicht.

Herr Strake führte das Projekt zum Thema Störgeräuschreduktion für Mobiltelefone in Kooperation mit der R&D-Gruppe der Firma NXP Semiconductors, Product Line Voice and Audio Solutions, Belgien im nunmehr insgesamt fünften Projektjahr fort. Im Berichtszeitraum lag der Fokus der Arbeiten auf der Erforschung zweistufiger Systeme basierend auf neuronalen Netzen und der Untersuchung von Fehlerfunktionen für das Netztraining im Frequenz- sowie Zeitbereich. Es wurde ein Verfahren entwickelt, bei welchem zunächst die Störgeräuschunterdrückung mit Hilfe eines long short-term memory (LSTM)-Netzwerks durchgeführt wird, wobei die rekurrente Netzstruktur im Vergleich zu traditionellen Verfahren eine deutlich verbesserte Unterdrückung nicht-stationärer Störgeräusche ermöglicht. Da die Sprachqualität durch eine solche erste Stufe beeinträchtigt werden kann, findet in der zweiten Stufe ein weiteres, auf direkter Schätzung des störungsfreien Sprachsignal-Spektrums mittels Faltungsnetzen (engl. convolutional neural networks, CNNs) basierendes Modell Anwendung, welches in der Lage ist, unterdrückte Sprachanteile wiederherzustellen. Es konnte gezeigt werden, dass durch die Anwendung einer solchen zweiten Stufe eine deutlich verbesserte Sprachqualität sowie eine stärkere Unterdrückung der Störgeräusche erreicht werden kann. Diese Ergebnisse wurden auf dem IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA) in New Paltz, New York publiziert [STRA/FIN1] und fanden großes Interesse.

## 4.2 Echokompensation / In-Car-Kommunikation

Sprachverbesserung in Fahrzeugen erforschen wir aktuell im Bereich der akustischen Echokompensation (engl. acoustic echo cancellation, AEC) für Freisprech-Telefonie und In-Car-Kommunikationssysteme (ICC-Systeme) zur Verbesserung von Konversationen zwischen Passagieren innerhalb einer Fahrzeugkabine. In beiden Anwendungsfällen wird die akustische Rückkopplung von Fahrzeug-Lautsprechern in das Fahrzeug-Mikrofon geschätzt und unterdrückt. Der robuste AEC-Algorithmus, den wir hierfür nutzen, ist das frequenzbasierte Kalman-Filter (engl. frequency domain adaptive Kalman filter, FDAKF). Im Kontext von ICC-Systemen wird der FDAKF als akustische „Feedback“-Unterdrückung (engl. acoustic feedback cancellation, AFC) genutzt. In diesem Kontext wurde die Publikation [FRA/FIN1] auf der DAGA in Rostock vorgestellt. Hierbei wurde untersucht, welche Auswirkung die geschätzte Übertragungsfunktion des FDAKF auf ein ICC-System hat. Die Übertragungsfunktion kann als Ganzes oder aber in unterschiedlich vielen Unterteilungen (Partitionierung) betrachtet werden. Eine gut gewählte Partitionierung kann die Komplexität des Algorithmus deutlich reduzieren. Weiterhin wurde eine verbesserte Methode zur Schätzung des sogenannten Messrauschens für den FDAKF entwickelt. Die Methode ist explizit für den Einsatz in AFC-Systemen ausgelegt. Sie ermöglicht eine stärkere Unterdrückung des Störsignals und verbessert gleichzeitig die Qualität des gewünschten Zielsignals erheblich. Die Ergebnisse wurden auf der International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP) in Brighton, Vereinigtes Königreich, vorgestellt [FRA/FIN2].

Nachdem Herr Abel das Institut im letzten Jahr verlassen hat, haben die Herren Meyer und Lohrenz das zweite Projektjahr des ZIM-Projekts HIFI-AEC zusammen mit der Firma Linguwerk GmbH aus Dresden bestritten und im Berichtszeitraum erfolgreich abgeschlossen. Im Rahmen dieses Projekts wurde eine Stereo-Echokompensation (engl. stereo acoustic echo cancellation (SAEC)) für den automotiven Bereich entwickelt, um auch bei laufendem Radio eine robuste Spracherkennung zur Bedienung eines Infotainmentsystems im Kfz zu ermöglichen. Das entwickelte Gesamtsystem, bestehend aus SAEC und einem weiteren Modul zur Unterdrückung des Restechos eliminiert dabei zuverlässig das Radiosignal aus dem Eingangssignal der Spracherkennungs-Software. Im zweiten Projektjahr lag der Fokus auf der Implementierung des Gesamtsystems in C++, nachdem dieses im letzten Jahr bereits in Form von MATLAB-Code an Linguwerk übergeben wurde. Außerdem wurden realistischere Anwendungsfälle wie die Hinzunahme von Fahrgeräuschen simuliert und erfolgreich getestet. Die Ergebnisse der Arbeiten wurden in einem Abschlussbericht [MEY/LOH/FIN1] festgehalten.

### 4.3 Beamforming

Im Rahmen des NBank-Förderprojektes mit der Firma Pan Acoustics wurde die Entwicklung eines adaptiven Beamformers erfolgreich abgeschlossen. Der Beamformer basiert auf einem zirkulären Mikrofonarray mit 13 Mikrofonen, folgt einem differentiellen Entwurf mit weitreichend frequenzunabhängiger Richtwirkung und kann die akustische Ausrichtung (Richtkeule) des verwendeten Mikrofonmoduls ganze 360° um das Modul herum ausrichten. Da sich mehrere Sprecher um das Mikrofonmodul befinden können, in der Regel jedoch nur einer davon aktiv spricht, ist die Algorithmik des Beamformers so konzipiert, dass sich die Richtkeule selbstständig auf den gerade aktiven Sprecher ausrichtet. Dies geschieht jedoch nur dann, wenn durch den Sprecher auch ein bestimmter Energie-Schwellenwert überschritten wird. Dadurch werden kurze, ungewünschte Störgeräusche (wie zum Beispiel das Herunterfallen eines Stiftes auf die Tischfläche) nicht zusätzlich verstärkt und es kann eine gute Sprachqualität gewährleistet werden. Weitere Details finden sich im Projekt-Zwischenbericht [FRA/ZHA/FIN1].

### 4.4 Künstliche Sprachbandbreiten-Erweiterung

Das Themenfeld der künstlichen Sprachbandbreitenerweiterung (artificial bandwidth extension, ABE) geht am IfN auf die Zielgerade. Zwei wichtige Publikationen sind nach Weggang von Johannes Abel im Berichtszeitraum noch zu verzeichnen.

Zum einen konnte in Kooperation mit der Arbeitsgruppe Auditorische Prothetik des Exzellenzclusters „Hearing4all“ an der Medizinischen Hochschule Hannover (MHH), Prof. Dr.-Ing. Waldo Nogueira, der Einsatz von ABE für hörgeschädigte Menschen mit Cochlea-Implantat (CI) im Kontext der Telefonie untersucht werden. Aufgrund von physikalischen Einschränkungen kann die Cochlea durch den implantierten Elektrodenstrang nur an wenigen (etwa 10-20) Orten zeitgleich angeregt werden, so dass nach der Orts-Frequenz-Transformation in der Cochlea nur eine sehr grobe Frequenzauflösung über den Hörnerv an das Gehirn weitergegeben werden kann. Erschwerend kommt hinzu, dass viele Telefonsignale eine beschränkte akustische Bandbreite aufweisen, so dass nur ein Teil der Elektroden während eines Telefonats angesteuert wird. In den gemeinsamen Untersuchungen wurde das Telefonsignal mittels ABE in der akustischen Bandbreite erweitert und so ermöglicht, dass mehr Elektroden angesteuert werden. In subjektiven Tests mit neun CI-Nutzern konnte eine statistisch signifikante Erhöhung der Sprachqualität sowie eine Verbesserung der Sprachverständlichkeit um über 17 % durch das ABE-Verfahren gezeigt werden. Die Arbeit wurde im Journal of the Acoustical Society of America veröffentlicht [FIN1].

In Telefonsignalen sind tiefe Sprecher-Frequenzen unterhalb von 300 Hz oft nicht mehr enthalten oder stark gedämpft. Abhilfe schafft eine künstliche Erweiterung in eben diesen Frequenzbereich. Bei einer solchen Bandbreitenerweiterung kommt es vornehmlich auf eine exakte und instantane Schätzung der Sprachgrundfrequenz des Sprechers an. Mittels eines ausgeklügelten Zustandsmodells werden die fehlenden Frequenzkomponenten dann rahmenweise synthetisiert. In einem subjektiven Hörtest konnte so in einem direkten Vergleich von ABE mit und ohne Erweiterung im unteren Band eine Verbesserung der Sprachqualität um 0,26 CMOS-Punkte erreicht werden (CMOS: Comparison mean opinion score). Der dazugehörige Journal-Artikel wurde bei den IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing veröffentlicht [FIN2].

#### 4.5 Sprach(de)codierung

Im Bereich der Sprach(de)codierung veröffentlichte Herr Zhao einen Zeitschriftenartikel in den IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing [ZHA/FIN1]. In diesem Artikel wird ein Postfilter mit faltenden neuronalen Netzwerken (CNNs) vorgeschlagen, um codiert übertragene Sprachsignale für verschiedene Schmalband- wie auch Breitband-Codecs zu verbessern. Das Verfahren liefert derart gute Ergebnisse, dass es die TU Braunschweig als Weltpatent angemeldet hat. Darüber hinaus wurde eine Gemeinschaftsarbeit mit dem Institut für Analysis und Algebra auf der International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP) in Brighton, UK, veröffentlicht [ZHA/FIN2]. Ziel dieser Arbeit war es, niedergratig quantisierte Sprache zu rekonstruieren. Dabei wurde eine besondere Form der Netzwerke, sogenannte primal-dual-Netzwerke, angewendet. Mit der Nutzung des Gewichtungsfilters (siehe 4.1) zur Berechnung der Fehlerfunktion wird das Netzwerk zusätzlich Wahrnehmungs-effizienter trainiert.

In der Sprachcodierung mit generativen adversarialen Netzwerken (GANs) wurde eine Masterarbeit erstellt [MA 19/003]. In dieser Arbeit werden Sprachcodierer und -decodierer unter Verwendung von GAN-basierten Frameworks entwickelt und verschiedene Netzwerktopologien sowie Verlustfunktionen untersucht und auf ihre Tauglichkeit für Sprachcodierung hin verglichen.

Im Rahmen des NBank-Förderprojektes mit der Pan Acoustics GmbH arbeitete Herr Zhao an einer intelligenten Soft-Audio-Decodierung für eine Funkstrecke. In Matlab wurde hierfür eine echtzeitfähige Sprachübertragungsplattform im 2,4 GHz ISM-Band mit Software-Defined-Radio-Geräten aufgebaut. Weitere Experimente zur Soft-Audio-Decodierung am Empfänger werden auf dieser Plattform durchgeführt. Darüber hinaus wird ein Signal-zu-Rauschleistungs-Schätzer (SNR-Schätzer) auf Basis der Empfangspegelwerte der verfügbaren

ISM-Chipsätze entwickelt. Der SNR-Schätzwert wird dann im Zuge der Soft-Audio-Decodierung verwendet.

#### **4.6 Automatische Spracherkennung**

Ein Kernforschungsgebiet im Bereich der automatischen Spracherkennung ist die Turbo-Informationsfusion, die es ermöglicht, mittels eines iterativen Austauschs von probabilistischer Information die Erkennungsgenauigkeit von zwei oder mehreren Erkennern zu verbessern.

Zu Beginn des Berichtszeitraums im Dezember haben wir mit der Publikation eines Artikels auf dem IEEE Workshop on Spoken Language Technology (SLT) in Athen eine wichtige neue internationale Bestmarke auf der TIMIT-Datenbank zur Phonemerkennung für kontextunabhängige und sprecherunabhängige akustische Modellierung erzielt. Dies wurde durch die Nutzung moderner hierarchischer Faltungsnetze zur akustischen Modellierung der einzelnen Amplituden- und Phaseninformation und der darauf folgenden Turbo-Informationsfusion erreicht [LOH/FIN1].

Durch die erfolgreiche Beantragung einer DFG-Sachbeihilfe innerhalb des Berichtszeitraums können die Arbeiten im Bereich der Turbo-Informationsfusion in der zweijährigen Projektlaufzeit deutlich intensiviert werden. Erste Ergebnisse im Rahmen des DFG-Forschungsvorhabens konnten in einer Masterarbeit [MA 19/005] erbracht werden, in der die Turbo-Fusion erstmalig erfolgreich auf die Nutzung von beliebig vielen Erkennern erweitert wurde. Zuvor wurden ausschließlich zwei Komponenten-Erkennen genutzt. Dies ermöglicht insbesondere die Anwendung der Turbo-Fusion für mehrere im Raum verteilte Erkennen. In ersten Experimenten konnte bereits gezeigt werden, dass durch die Nutzung unterschiedlicher Impulsantworten ein Fusionsgewinn erzielt werden kann.

Zur Erweiterung der für verteilte Spracherkennung notwendigen Modularität wurde außerdem erforscht, inwieweit bidirektionale neuronale Netze in der Lage sind (ähnlich wie der bisher genutzte Turbo-FBA), zeitlich unbegrenzte zeitliche Information in die Erkennung mit einzubeziehen. Dabei arbeiten diese BLSTMs mit Phonemwahrscheinlichkeiten sowohl am Eingang als auch am Ausgang und erlauben damit sehr flexible Verschaltungen, zukünftig hoffentlich auch im Sinne einer iterativen Turbo-Decodierung. Überraschende Erkenntnisse, die sich durch die Nutzung solcher BLSTMs ergeben haben, wurden in Form einer Publikation für den IEEE Workshop on Automatic Speech Recognition and Understanding (ASRU) in Singapur angenommen.

Im Bereich der mehrkanaligen robusten automatischen Spracherkennung auf Grundlage der vierten CHiME-Challenge (CHiME: Computational Hearing in Multisource Environments) betreute Herr Strake bereits während des vorher-

rigen Berichtszeitraums eine Masterarbeit zur Verbesserung des verwendeten akustischen Modells. Durch die Nutzung eines neuartigen dicht verbundenen Faltungsnetzes (engl. densely connected neural network, DenseNet) und die Kombination mit einem rekurrenten Modellanteil, sowie eines speziellen, auf ganzen Sätzen basierenden Trainings, konnte ein hochperformantes Modell entwickelt werden. Die zugehörigen Ergebnisse wurden bereits auf dem 2018 IEEE Workshop on Spoken Language Technology (SLT) in Athen mit einer Posterpräsentation publiziert [STRA/LOH/FIN1].

#### **4.7 Emotionserkennung**

Das ZIM-Projekt „Erkennung von Emotionen aus akustischen Signalen“ wurde von Herrn Meyer in Kooperation mit der Firma eye square GmbH aus Berlin Anfang diesen Jahres erfolgreich abgeschlossen. Entwickelt wurde ein System zur Emotionserkennung, welches auf modernen Methoden des maschinellen Lernens basiert. Das Besondere an dem System ist, dass die Erkennung der Emotionen auf der Analyse eines 2-dimensionalen Log-Mel-Spektrogramms basiert, anstelle von tausenden speziell aus den Sprachsignalen extrahierten Merkmalen, wie es sonst üblich ist. Das entwickelte System stellt dadurch im Grunde einen Bildklassifikator für Bilder unterschiedlicher Breite dar und kann bis zu sechs Emotionen aus der menschlichen Stimme erkennen. Dabei schließt der Erkennen auf einer renommierten Datenbank mit dem derzeitigen internationalen Spitzenreiter auf. Die Resultate und Erkenntnisse aus diesem Projekt wurden in einem Abschlussbericht [MEY/FIN1] dokumentiert. Außerdem ist auf Basis der Resultate noch eine Publikation für nächstes Jahr vorgesehen.

Nach Abschluss der Graduiertenschule KoMMA.G im Herbst 2019 arbeitet Herr Xu nun mit Herrn Meyer im neu gestarteten BMBF-Förderprojekt „MindMarker“ in Kooperation mit der Firma Mind Intelligence UG aus Berlin. In diesem Projekt soll ein automatisches System zur Depressionserkennung auf Basis der Stimme eines Telefonnutzers entwickelt werden, welches zusätzlich einen Sprachroboter umfasst, um Nutzern per Telefon oder App automatisch relevante psychologische Fragen zu stellen. Mit Hilfe des künstlichen Sprachdialogs können persönliche Sprachäußerungen erhoben werden, um die Depressions-Detektion anhand der Stimme durchführen zu können. Damit dieser Dialog erfolgreich verläuft, soll die Auswahl der Fragen intelligent auf Basis der emotionalen Stimmung der Nutzer beruhen. Das IfN wird in diesem Zusammenhang einen sprachbasierten Emotionserkennung sowie ein Modul zur Verbesserung der Sprachqualität entwickeln, da diese je nach Aufenthaltsort der Nutzer stark gestört sein kann.

## 4.8 Akustische Diagnose in Fahrzeugen

In Zusammenarbeit mit IAV GmbH wurde ein Kooperationsprojekt „AcuDia“ gestartet, in dessen Rahmen ein System entwickelt werden soll, welches als KI-basierte, automatisierte Fehlergeräuscherkennung in der Fahrzeugdiagnose eingesetzt werden soll. Dadurch soll mit Hilfe von akustischen Signalen eine Diagnose von Fahrzeugen während des Betriebs erfolgen. Im Betrieb befindliche Fahrzeuge und ihre Komponenten geben Geräusche ab, welche sowohl vom Betriebszustand als auch vom Zustand der Komponenten abhängig sind. Ein aufmerksamer Fahrer, der das normale Betriebsgeräusch seines Fahrzeugs kennt, wird durch solche Geräusche oftmals aufmerksam, bevor ein Totalausfall eines Bauteils oder gar des Fahrzeugs eintritt. In Ergänzung dazu kann ein Servicemitarbeiter mit Kenntnis über diverse Fehlerzustände an unterschiedlichen Fahrzeugen und Fahrzeugtypen anhand einer Testfahrt eines fehlerhaften Fahrzeuges aus dem Betriebsgeräusch verschiedene Fehlertypen erkennen und oft auch deren Quelle lokalisieren.

Im Themenfeld der Detektion und Klassifizierung akustischer Events (acoustic event detection, AED) sind neuronale Netze imstande, Erkennungsraten vergleichbar mit der menschlichen Performanz zu erzielen. Im Projekt AcuDia soll nun die Expertise eines erfahrenen Servicemitarbeiters mit neuronalen Netzen nachgebildet werden, indem ein Klassifikator mit Audioaufnahmen aus Betriebsgeräuschen mit und auch ohne Fehlerereignis von Fahrzeugen trainiert wird. Damit soll ein Diagnosesystem realisiert werden, welches während des Fahrzeugbetriebs Informationen zum Zustand der Fahrzeugkomponenten liefert und vor drohenden Ausfällen warnt.

Da die Akquise von ausreichenden Datenmengen für einen Fahrzeuggeräusch-Datensatz zeitgleich abläuft, wurde zu Beginn des Projektes ein akustischer Event-Erkenner auf Audiodaten einer allgemeinen Geräusch-Datenbank umgesetzt. Der Erkenner wurde mit gemischten Audiodaten aus nicht-stationärem Hintergrundgeräusch und störungsfreien Events trainiert und getestet. Ein Visualisierungstool ist entstanden, und es sind geeignete Qualitätsmetriken entwickelt worden. Im weiteren Projektverlauf sollen erst das Hintergrundgeräusch und später, sobald geeignete Daten in ausreichender Menge vorhanden sind, auch die Events gegen Fahrzeugaufnahmen ausgetauscht werden, um so graduell ein System für den realen Einsatz im Fahrzeug zu erhalten.

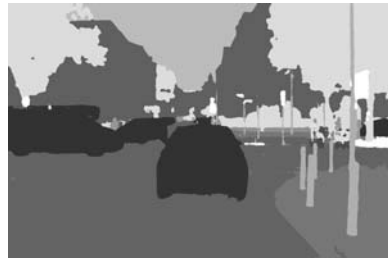
## 5. Computer Vision

### 5.1 Robuste Semantische Segmentierung und Tiefenschätzung

Das Themenfeld „semantische Segmentierung“ hat sich mittlerweile zu einer der Kernkompetenzen in unserem Forschungsgebiet Computer Vision entwi-



(a) Eingangsbild



(b) Semantische Segmentierung

Abbildung 11: Qualitative Ergebnisse des im IfN entwickelten Netzwerks zur semantischen Segmentierung; im Bild rechts entsprechen bestimmte Farben (Grauwerte) bestimmten Objektklassen.

ckelt. Dies zeigt sich an diversen Publikationen, die wir im Berichtszeitraum auf internationalen Tagungen vorgestellt haben [BAE/FIN1], [BOL/FIN1], [BOL/BAE/FIN1], [LOE/BAE/FIN1]. Ein Beispiel zur Performanz des IfN-Segmentierungsnetzwerks ist in **Abbildung 11** zu sehen.

Des Weiteren haben wir das Themenfeld um Teacher-Student-Ansätze erweitert. Dabei wird ein kleineres Netzwerk (Student) von einem größeren Netzwerk (Teacher) trainiert. Das IfN konzentriert sich hier auf Ansätze zur Erhöhung der Robustheit gegenüber sogenannten adversarialen Angriffen – Szenarien, in denen das Eingangsbild von einem potentiellen Angreifer bewusst verändert wird, um das jeweilige neuronale Netzwerk zu täuschen. Eine erste Veröffentlichung zu dieser Thematik hat Herr Bär auf dem Safe Artificial Intelligence for Autonomous Driving (SAIAD) Workshop der Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) 2019 in Long Beach, USA, vorgestellt. Es trägt den Titel „On the Robustness of Redundant Teacher-Student Frameworks for Semantic Segmentation“ [BAE/FIN1]. Dabei wird ein Teacher-Student-Paar, bestehend aus einem statischen (d.h. mit einmalig trainierten Parametern) Teacher-Netzwerk und einem parametrisch adaptiven Student-Netzwerk, um ein parametrisch statisches Student-Netzwerk erweitert. Mithilfe einer neu entworfenen Kostenfunktion wird dabei das adaptive Student-Netzwerk (gedacht als z.B. im Fahrzeug online lernendes Netzwerk) dazu gezwungen, Merkmale zu extrahieren, die sich von den extrahierten Merkmalen des statischen Student-Netzwerks unterscheiden. Das führt dazu, dass mit diesem Netz-Triplet Mehrheitsentscheidungen getroffen werden können, die robust gegenüber adversarialen Angriffen sind.

Neben der semantischen Segmentierung entwickelte das IfN nun auch eine Instanz-Segmentierung, die in einer studentischen Arbeit [MA 19/011] imple-



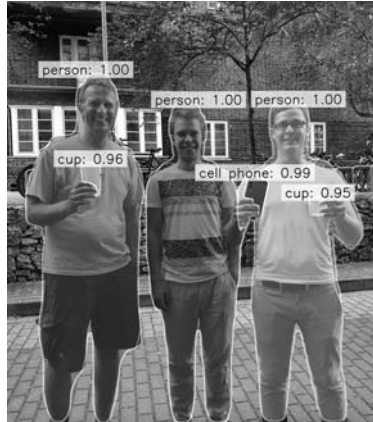


Abbildung 12: Ein Beispiel der auf der TU Night gezeigten Demo zur instanzbasierten Segmentierung. Zu sehen sind von links nach rechts Prof. Tim Fingscheidt zusammen mit einem Studenten und Marvin Klingner. Alle Personen im Bild werden vom neuronalen Netzwerk pixelweise als Klasse „person“ erkannt. Zusätzlich werden einige Objekte, wie Becher („cup“) oder Mobiltelefone („cell phone“), richtig erkannt und segmentiert.

mentiert wurde. In einer weiteren studentischen Arbeit [MA 19/014] wurde das hochkomplexe Netzwerk zur Instanz-Segmentierung auf Ansätze zur Erhöhung der Effizienz untersucht. Eine Instanz-Segmentierung unterscheidet sich von der semantischen Segmentierung in zwei wesentlichen Aspekten. Während die semantische Segmentierung eine pixelweise Klassifikation auf dem Gesamtbild durchführt, fokussiert sich die Instanz-Segmentierung nur auf spezielle Objektklassen, wie Personen, Fahrzeuge oder auch Verkehrsschilder. Des Weiteren findet im Gegensatz zur semantischen Segmentierung auch eine Unterscheidung zwischen Objekten gleicher Klasse statt. Zwei nebeneinander befindliche Fahrzeuge werden als Fahrzeug 1 und Fahrzeug 2 klassifiziert. Neben Verkehrsszenen können mit den richtigen Datensätzen auch andere Szenarien instanzweise segmentiert werden. Ein anschauliches Beispiel dieses Systems von der diesjährigen TU Night ist in **Abbildung 12** illustriert.

Ein neueres Forschungsfeld am IfN ist die Tiefenschätzung aus einzelnen Kamerabildern. Hierbei wird jedem Pixel innerhalb eines Bildes ein Abstand relativ zu der Kameraebene zugeordnet. Damit wird es ermöglicht, ein zweidimensionales Kamerabild in eine Punktwolke im dreidimensionalen Raum umzurechnen und so detektierte Objekte (z.B. aus einer Instanz-Segmentierung) im drei-

dimensionalen Raum zu positionieren. Frühere klassische Verfahren beruhen auf Stereo-Bildern oder Video-Sequenzen. Aktuell ist es mit Hilfe von neuronalen Netzwerken möglich, diese nur während des Trainings zu verwenden und während der Inferenz auf Einzelbildern zu arbeiten. Bei geeignet gewähltem Training umgeht man so Probleme, die durch bewegte Objekte innerhalb von Video-Sequenzen oder durch unterschiedliche Verdeckungen bei Stereo-Bildern entstehen. Herr Klingner versucht des Weiteren, durch sogenannte Multi-Task-Learning-Ansätze Synergien aus der Kombination von semantischer Segmentierung und Tiefenschätzung zu erzielen. Eine Publikation ist in Vorbereitung.

Im Rahmen des Erasmus+-Programms wurde im Berichtszeitraum unter Betreuung von Herrn Elshamy eine Masterarbeit angefertigt, die unterschiedliche Datencontainer für Deep Learning auf ihre unterschiedlichen Eigenschaften bzgl. Zugriffsgeschwindigkeit, Kompatibilität und Handhabbarkeit untersucht [MA 19/012].

## 5.2 Unüberwachte Domain Adaptation (UDA)

Ein zweites strategisch wichtiges Themenfeld des IfN im Bereich Computer Vision ist die sog. Domain Adaptation. Wenn die Daten, die einem neuronalen Netz im Betrieb zugeführt werden, stark von den Daten des Trainingsmaterials abweichen, dann kommt es aufgrund dieses sog. Domänen-Mismatches zu einem Einbruch der Performanz. Um dem entgegenzuwirken, gibt es typischerweise zwei verschiedene Methoden der Domänenanpassung. In der ersten werden die Bilder der (annotierten) Trainingsdomäne durch einen Stiltransfer so verändert, dass diese aussehen wie die Bilder, die im Online-Betrieb durch das Netz verarbeitet werden. Ein weiterer Ansatz ist es, domänen-invariante Merkmale zu extrahieren. Letzteren Ansatz verfolgt Herr Bolte.

Im Rahmen einer Masterarbeit [MA 18/020] wurde ein Verfahren implementiert, das durch ein diskriminatives Training auf beiden Domänen domänen-invariante Merkmale extrahiert. Es zeigte sich, dass sich dadurch nicht nur die Performanz auf der anvisierten Zieldomäne, sondern auch auf der ursprünglichen Trainingsdomäne verbessert. Wie in **Tabelle 2** zu sehen, ist es durch die unüberwachte Domänenanpassung zum einen möglich, die Performanz auf dem (ungelabelten) Zieldatensatz KITTI von 44,1 % auf 59,5 % zu erhöhen. Außerdem konnte durch die domänen-invarianten Merkmale sogar die Performanz auf den Daten der Quelldomäne Cityscapes von 56,0 % auf 59,8 % erhöht werden, was den großen Vorteil dieser Methode gegenüber anderen Verfahren ausmacht.

Aufbauend auf den Ergebnissen wurde zudem ein erstes Abstandsmaß zwischen den Domänen entwickelt. Auf Grundlage dieser Arbeiten wurde ein Paper mit dem Titel „Unsupervised Domain Adaptation to Improve Image Segmentation Quality Both in the Source and Target Domain“ [BOL/FIN1] verfasst und auf

Trainiert auf	Test Set Ergebnisse [mIoU]	
	$\mathcal{D}_{CS}^{\text{test}}$	$\mathcal{D}_{KITTI}^{\text{test}}$
$\mathcal{D}_{CS}^{\text{train}}$ (ohne UDA)	56.0 %	44.1 %
$\mathcal{D}_{\text{all}}^{\text{train}}$ (mit UDA)	<b>59.8 %</b>	<b>59.5 %</b>

Tabelle 2: Ergebnisse auf den test sets für Cityscapes ( $\mathcal{D}_{CS}^{\text{test}}$ ) und KITTI ( $\mathcal{D}_{KITTI}^{\text{test}}$ ) mit und ohne unüberwachter Domänenanpassung (UDA)

dem Safe Artificial Intelligence for Automated Driving (SAIAD) Workshop, der im Rahmen der Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) 2019 in Long Beach, USA, stattfand, veröffentlicht. Das Paper wurde mit dem Best Paper Award ausgezeichnet, siehe auch den Sonderbericht auf Seite 119.

### 5.3 Gelernte Bildkompression

Das von Herrn Löhdefink bearbeitete Grundlagenforschungsprojekt zu generativen adversarialen Netzwerken (GANs) im automatischen Fahren haben wir verstärkt in Richtung gelernter Bildkompression mittels neuronaler Netzwerke entwickelt. Es unterteilt sich in drei Themenkomplexe.

Zunächst ging es um die Bildübertragung zwischen Steuergeräten auf dem Fahrzeugbussystem zur verteilten Perzeption. Hierzu wurde eine Veröffentlichung auf dem Intelligent Vehicles (IV) Symposium 2019 mit dem Titel „On Low-Bitrate Image Compression for Distributed Automotive Perception: Higher Peak SNR Does Not Mean Better Semantic Segmentation“ [LOE/BAE/FIN1] eingereicht und vorgestellt. In der Veröffentlichung wurde gezeigt, dass gelernte Kompression mit GANs gut für nachfolgende Funktionen geeignet ist, die ebenfalls mit neuronalen Netzen umgesetzt werden. Im Bereich niedriger Bitraten konnten mit diesem Ansatz bereits etablierte Baselines zur Bildcodierung wie z.B. JPEG2000 in der Performanz übertroffen werden.

Das zweite Thema ist die Fokussierung der Kompression auf individuelle Bereiche des Bildes. Hierbei wird eine Region of Interest (ROI) in Form einer Maske in die komprimierte Repräsentation eingebettet. Hierzu sind verschiedene Methoden entwickelt worden, basierend entweder auf einer frühen oder späten Fusion. Der Ansatz führte im Bereich der ROI zu einer Verbesserung der Bildqualität, wobei diese in der ROI selbst, aber auch im Gesamtbild ausgewertet wird. Eine weitere Erkenntnis ist, dass die Methode unabhängig von der verwendeten mathematischen Operation in der Fusion gut funktioniert.

Das dritte Thema befasst sich mit der Verwendung der Vektorquantisierung anstelle der Skalarquantisierung im Training der GANs. Vektorquantisierung ermöglicht eine geringere Bitrate bei gleicher Bildqualität bzw. eine höhere Bild-

qualität bei vergleichbarer Bitrate. Für neuronale Netze ist während des Trainings eine differenzierbare Näherung der Quantisierungsfunktion erforderlich, da der Backpropagation-Algorithmus Gebrauch von Fehlergradienten macht, die bei der echten Quantisierung nicht verfügbar sind. Die Bitrate beim Gebrauch von Vektorquantisierung kann im Vergleich zur unquantisierten Variante (8 Bit pro Pixel im sog. latent space) bei fast gleicher Bildqualität ca. um den Faktor 10 reduziert werden. Es hat sich gezeigt, dass die implementierte Vektorquantisierung in allen Metriken besser als die Skalarquantisierung abschneidet [MA 19/010].

## 5.4 Corner Cases

Zum Thema Corner Cases hat Herr Bolte eine Veröffentlichung auf dem Intelligent Vehicles (IV) Symposium 2019 in Paris vorgestellt [BOL/BAE/FIN1]. In dem Paper wurde eine erste Definition erbracht, die einen Corner Case auf Metriken mehrerer Teilsysteme zurückführen lässt und jedem Bild eines Videos einen Corner-Case-Score zuordnet. Dabei wurde ein Corner Case definiert, wenn sich ein nicht-prädizierbares, relevantes Objekt in relevanter Position zum eigenen Fahrzeug befindet. Die Nicht-Prädizierbarkeit wird dabei durch einen auf der Bildsequenz operierenden Bildprädiktor messbar gemacht. Die Relevanz eines Objekts ergibt sich aus einer semantischen Segmentierung: Fußgänger, Fahrradfahrer und andere Verkehrsteilnehmer sind relevant. Die relevante Position ergibt sich aus der Trajektorienprädiktion des sog. Ego-Fahrzeugs. Zu letzterem Aspekt der Trajektorienprädiktion wurden im Berichtszeitraum in Kooperation mit Volkswagen zwei weitere Beiträge auf internationalen Fachtagungen publiziert [FIN3], [BOL/FIN2].

Aufbauend auf den Arbeiten aus dem Paper wurde in einer Bachelorarbeit [BA 19/708] ein Tool zur Detektion von Corner Cases auf großen Datenmengen entwickelt. Das Tool ist über eine grafische Benutzeroberfläche bedienbar und so aufgebaut, dass es durch Plug-Ins erweitert werden kann. In weiteren Arbeiten im Bereich der Corner-Case-Detektion können somit schnell und einfach neue Metriken in das vorhandene Tool hinzugefügt werden.

Für die weiteren Arbeiten an der Corner-Case-Detektion wäre ein annotierter Datensatz mit tatsächlichen Corner Cases sehr wünschenswert. Hierfür wurden ein Car-PC und Fahrzeugkameras beschafft, mit denen über einen längeren Zeitraum ein eigener Datensatz aufgenommen werden soll. Um reale Corner Cases aufzuzeichnen, werden definierte Szenarien von Freiwilligen des Instituts gespielt. Es ist geplant, den so entstandenen Datensatz nach Möglichkeit zu veröffentlichen. Erste Aufnahmen unter alleiniger Verwendung der Kameras wurden bereits erstellt.

## 5.5. KI-Projektfamilie

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hat auf Anregung der VDA-Leitinitiative „Autonomes und vernetztes Fahren“ im Kooperationsvorhaben „KI-Plattform-Konzept“ mit vielen Partnern aus Industrie und Wissenschaft die Entwicklung einer öffentlichen Daten- und Lernplattform für das maschinelle Lernen mit besonderem Fokus auf das autonome Fahren vorbereitet. Neben wirtschaftlichen und juristischen Fragestellungen, die für eine solche Plattform behandelt werden müssen, spielen auch hardware-, sicherheits- und datentechnische Aspekte eine Rolle. Das IfN hat in dem Projekt besonders an den Themen zu Datentypen, Formaten und Metainformationen mitgearbeitet. Der Fokus lag in dem Projekt auf Konzepten und Methoden zur Selektion und Kompression anfallender Daten.

In dem dreijährigen BMWi-Förderprojekt „KI-Absicherung“ ist das IfN von der Volkswagen Group Innovation unterbeauftragt. In dem Projekt geht es vor dem Hintergrund des autonomen Fahrens zunächst allgemein um die Erhöhung der Robustheit von künstlicher Intelligenz gegenüber Veränderungen der Eingangswerte. Hier steht u.a. auch die Robustheit gegenüber adversarialen Angriffen speziell im Fokus. Das IfN beteiligt sich im Projekt mit Beiträgen zur Absicherung von KI-Blackbox-Funktionen mithilfe von Teacher-Student-Netzwerken und GAN-Autoencodern.

# **Abteilung Mobilfunksysteme (Kürner)**

## **1. Forschungsfelder der Abteilung**

Die Forschungsfelder der Abteilung Mobilfunksysteme umfassen verschiedenste Aspekte der Mobilfunktechnik sowohl im UHF-Frequenzbereich unterhalb 6 GHz als auch im Millimeterwellen- und THz-Bereich. Die Aktivitäten im Berichtsjahr lassen sich in drei Anwendungsfelder abbilden, in denen die Abteilung Mobilfunksysteme seit Jahren tätig ist und die sich auch in der Struktur der Abschnitte fünf bis sieben wiederfinden. Sie umfassen „Methoden und Algorithmen für die Planung und Optimierung von Infrastrukturnetzen“, „Fahrzeug-Kommunikation“ und „THz-Kommunikation“ [KÜR15], [KÜR17], [KÜR18], [KÜR20], [KÜR22], [KÜR9], [KÜR13]. Der Trend, dass die Grenzen zwischen den ursprünglich sehr disjunkten Anwendungsfeldern insbesondere im Zusammenhang mit der Einführung der fünften Generation (5G) des Mobilfunks zunehmend verschwimmen, bei der alle diese Anwendungsfelder relevant sind und zum Teil gemeinsam betrachtet werden müssen, setzte sich weiter fort. Für die Abteilung ist das sehr vorteilhaft, da wir aus allen drei Anwendungsfeldern unsere Kompetenzen in die zu beantwortenden Forschungsfragestellungen einbringen können. Mittlerweile ist unsere eigenentwickelte Simulationsplattform SiMoNe (Simulator for Mobile Networks) das zentrale Werkzeug für nahezu alle unsere Forschungsaktivitäten. Den Weiterentwicklungen von SiMoNe im Berichtszeitraum ist daher das eigenständige Kapitel 4 gewidmet.

## **2. Projekte**

Alle Wissenschaftlichen Mitarbeiter sind in Projekte mit der Industrie, anderen Universitäten oder Instituten innerhalb der TU Braunschweig eingebunden. Auch in diesem Geschäftsjahr konnten neue Projekte akquiriert werden. Wir sind in folgenden nationalen und internationalen Projekten engagiert:

### **2.1 Internationale Projekte**

Im Jahr 2019 haben wir an insgesamt zwei von der EU geförderten Projekten aus dem Horizon2020(H2020)-Forschungsrahmenprogramm mitgewirkt. Das im Juli 2018 begonnene Projekt H2020-ThoR („Terahertz end-to-end wireless systems supporting ultra-high data Rate applications“), das je zur Hälfte von der EU und Japan gefördert wird und das wir auf europäischer Seite koordinieren, wurde ebenso fortgesetzt wie das seit September 2017 laufende Projekt H2020-TERAPOD („Terahertz based Ultra High Bandwidth Wireless Access Networks“). Ebenfalls fortgesetzt wurde ein Projekt zur Nanokommunikation im Rahmen des „Indonesian-German Center for Nano and Quantum Technologies

(IG-Nano)“. Mit dem State Key Laboratory for Rail Traffic Control and Safety der Beijing Jiaotong University gibt es eine Kooperation auf dem Gebiet der Ausbreitungsmodellierung für die Eisenbahn-Kommunikation [ECK/REY/KÜR1], [ECK/REY/KÜR2], [KÜR1], [KÜR2], [KÜR5], [KÜR7], [KÜR26]. Im Rahmen dieser Kooperation wurde das Projekt „Research and Application of Mobile Communication Network Theory and Technology for High-Speed Railway in Indonesia“ abgeschlossen. Im Rahmen eines „Seed-Funding“-Projekts der TU Braunschweig mit der Universität Tampere haben wir Themenstellungen zur Simulation von Drohnen, die mit mobilen Endgeräten ausgestattet sind und sich in Mobilfunknetzen bewegen, sowie der THz-Kommunikation für Fahrzeuganwendungen bearbeitet. Prof. Kürner leitet die IEEE 802.15 Technical Advisory Group (TAG) THz und ist weiterhin als Advisory Member im NGMN Konsortium (Next Generation Mobile Networks) aktiv. Er ist darüber hinaus Mitglied im Board of Directors der European Association on Antennas and Propagation (EurAAP).

## **2.2 Nationale Förderprojekte**

Seit Juni 2017 arbeiten wir als Unterauftragnehmer der Volkswagen AG am BMBF-Projekt 5G Netmobil mit. Der Höhepunkt des Berichtsjahres war im Juli die Bewilligung der DFG-Forschungsgruppe Meteracom (Metrologie für die THz-Kommunikation), deren Sprecher Prof. Kürner ist. Wir sind Mitglied bei TUBS.digital.

## **2.3 Industrieprojekte**

Ein Projekt mit der Elektronik-Entwicklung der Volkswagen AG zur Berücksichtigung des Einflusses der Fahrzeugantenne auf die Empfangsqualität konnte abgeschlossen werden [DRE/KÜR4], [DRE/KÜR1]. Das im Jahr 2018 begonnene Projekt mit der Volkswagen AG zur Vorbereitung der 5G-Modellregion Wolfsburg-Braunschweig wurde fortgesetzt. Darüber hinaus wurde ein neues Projekt mit der Volkswagen AG zur Lokalisierung mit Millimeterwellen gemeinsam mit dem Institut für Hochfrequenztechnik der TU Braunschweig eingeworben. Das 2017 gestartete Projekt mit der Hytera Mobilfunk GmbH zur Frequenzplanung in TETRA-Netzen wurde abgeschlossen. Das im vergangenen Jahr begonnene Projekt zur regulatorischen Behandlung des Einflusses von Drohnen, die mit Endgeräten ausgestattet sind, das wir für die Deutsche Telekom durchführten, wurde ebenso abgeschlossen wie das von der PreHCM GmbH beauftragte Projekt „Smart Coordination“, bei dem die Konsequenzen der Einführung von selbstorganisierenden Funktionen (Self-Organising Network – SON) sowie flexibel konfigurierbarer Antennen bei 5G auf die Grenzkordinierung und die Kordinierung mit Funkmessstationen untersucht wurden. Für die Deutsche Funkturm GmbH haben wir eine Studie zur Simulation der Funkversorgung in der

Eisenbahn durchgeführt. Neu begonnen wurde das Projekt „Record and Replay“ mit IAV GmbH in Gifhorn.

### **3. Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Abteilung**

Im Berichtszeitraum waren zehn Wissenschaftliche Mitarbeiter in der Abteilung beschäftigt. Zum 30.11.2019 besteht die Abteilung aus neun Wissenschaftlichen Mitarbeitern. Das Anwendungsfeld „Methoden und Algorithmen für die Planung und Optimierung von Infrastrukturnetzen“ wurde von den Herren Dreyer, Schweins, Thielecke und Herold (seit 01.07.2019) bearbeitet. Das Gebiet der THz-Kommunikation bearbeiteten die Herren Rey (bis 31.12.2018), Eckhardt, Jung (seit 01.04.2019), Herold und Doeker (seit 01.11.2019). Das Forschungsgebiet „Fahrzeug-X-Kommunikation“ wurde von den Herren Dreyer, Nan und Thielecke bearbeitet. Vom 25. bis 28. März 2019 konnten wir Herrn Dr. Enrico Vitucci [KÜR4] von der Universität Bologna als Gastwissenschaftler bei uns begrüßen, um die existierende Kooperation auf dem Gebiet der Funkkanalmessungen [KÜR4] weiter zu vertiefen. Im Rahmen des Projekts mit der Universität Tampere war Herr Vitaly Petrov vom 13. Mai bis 7. Juni 2019 als Gastwissenschaftler bei uns tätig. Tatkräftig unterstützt wird die Abteilung durch Frau Beyer sowie durch eine Vielzahl von wissenschaftlichen Hilfskräften und Studierenden, die im Rahmen ihrer Bachelor- und Masterarbeiten in der Abteilung mitarbeiten. Im Berichtszeitraum wurden jeweils sechs Bachelor- und Masterarbeiten abgeschlossen. Darüber hinaus durften wir vom 13. Mai bis 8. Juli Herrn Pranay Reddy als Interim unserer Partneruniversität IIT Bombay bei uns begrüßen. Roman Alieiev, Guillaume Jornod [KÜR3], [KÜR10], [KÜR11] (beide Volkswagen AG) und Paul Unterhuber [KÜR6] (Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt – DLR) werden von Prof. Kürner derzeit als externe Doktoranden betreut.

### **4. Simulationsplattform SiMoNe**

Die Simulationsplattform „SiMoNe“ ist eine eigenständige Entwicklung der Abteilung für Mobilfunksysteme. Ursprünglich wurde die Plattform konzipiert, um die große Anzahl an unterschiedlichen und komplexen Simulationsszenarien und -modellen beherrschbar zu machen, die in verschiedenen Projekten und studentischen Arbeiten zum Einsatz kommen. Mittels einer webbasierten Schnittstelle sind das Zusammenarbeiten und die Kooperation sowohl innerhalb des Instituts als auch mit externen Partnern relativ einfach möglich. SiMoNe ermöglicht es, reale und realitätsnahe Mobilfunknetze auf Basis von geographischen Daten, Funknetztopologien, Pfadverlustprädiktionen [MA 19/002] und weiteren netzbezogenen Daten auf Link- und System-Ebene realistisch zu simulieren. Die SiMoNe zugrunde liegenden Modelle werden zum Teil aus Messdaten abgeleitet,



siehe z. B. [BA 19/712]. Im Berichtszeitraum ist im Rahmen einer Bachelorarbeit [BA 19/702] ein Produktvideo entstanden, das auf der SiMoNe-Projektseite verlinkt ist: <https://www.ifn.ing.tu-bs.de/research/projects/ms0/fg2/>

Neben der schon bekannten echtzeitfähigen 2D-Visualisierung können Simulationen nun auch zur Laufzeit dreidimensional visualisiert werden. Dies umfasst neben Gebäuden und Fahrzeugen auch die Darstellung von Strahlen des verwendeten Pfadverlust-Prädiktors. Für die Erstellung von komplexen dreidimensionalen Objekten wurde ein Plugin für das freie CAD-Tool SketchUp entwickelt [BA 19/705]. Hierin lassen sich beispielsweise Indoor-Szenarien mit Fenstern, Tischen und Schränken visuell gestalten und anschließend in SiMoNe importieren.

Für die Generierung von Outdoor-Simulationsszenarien hat Herr Thielecke eine neue Anwendung entwickelt, die eine grafische Möglichkeit für die Konfiguration grundlegender Parameter bietet. Dies umfasst sowohl die Standorte der Basisstationen als auch die physikalische Konfiguration der auf dem Sendemast befindlichen Antennen und den Import geographischer Daten (Straßen, Gebäude, Landnutzungsklassen und Höhendaten) aus öffentlichen Datenquellen, wie z.B. aus Open Street Map oder dem CORINE-Projekt, die unter Angabe eines geographischen Begrenzungspolygons extrahiert werden können. Zur initialen Bewertung des erstellten Szenarios können bereits vor dem Export einfache kartenbasierte Pfadverlust-Prädiktionen auf Basis des Okumura-Hata-Modells durchgeführt und visualisiert werden. Das erstellte Szenario kann anschließend in SiMoNe importiert und innerhalb weitergehender Simulationen verwendet werden. Der Fokus dieser Anwendung zur Erstellung und Verwaltung neuer Simulationsszenarien ist eine einfache, intuitive Bedienung.

Im Rahmen der H2020 EU-Projekte TERAPOD [ECK1] und ThoR [JUNG/ECK/DRE/KÜR1] wird für die detaillierte Analyse der Übertragungsstrecke zwischen einem Sender und einem Empfänger ein Link-Level-Simulator entwickelt, der vollständig in die Entwicklungsumgebung SiMoNe integriert ist. Hierbei wird für die Kanalmodellierung auf die Ergebnisse der bereits vorhandenen strahlenoptischen Pfadverlust-Prädiktion zurückgegriffen. Die modulare Struktur des Simulators ermöglicht die Integration und Untersuchung von Funkstrecken in Abhängigkeit der Modulationsverfahren, Kanalcodierung, Detektorstruktur [BA 19/704] und berücksichtigt den Einfluss von nicht idealen Hochfrequenz-Komponenten der Übertragungsstrecke (engl. RF-Impairments).

Im Rahmen einer Masterarbeit [MA 19/017] ist ein Modul entstanden, mit dem die Ortungsgenauigkeit von GPS-Empfängern in Abhängigkeit von Ort und Tageszeit simuliert werden kann. Dabei kommt erneut ein Ray Tracer zum Einsatz, der um Modelle zur Beachtung der atmosphärischen Brechung elektromagnetischer Wellen erweitert wurde. Mit der Berechnung der Ortungsgenauigkeit wird

es in Zukunft möglich sein, V2X-Applikationen noch realistischer zu simulieren und deren Leistungsfähigkeit unter dem Einfluss der Szenario-spezifischen Ortungsungenauigkeit zu evaluieren sowie Untersuchungen zur Lokalisierung beim Beamforming in 5G-Netzen durchzuführen, siehe auch Abschnitt 5.2.

## **5. Methoden und Algorithmen für die Simulation, Planung und Optimierung von Infrastrukturnetzen**

### **5.1 Smart Coordination**

Mit der Einführung intelligenter und dynamisch konfigurierbarer Netzkomponenten in den Mobilfunknetzen im Zuge des Aufbaus von 5G- und der Erweiterung von 4G-Netzen steht die Telekommunikationsregulierung vor neuen Herausforderungen. Gerade im Kontext 5G ist mit einer Durchdringung von „Self Organizing Networks“ (SON) [MA 19/008] zu rechnen, bei denen Algorithmen auf der Basis automatisierter Messungen ebenfalls automatisiert die Funknetzkonfiguration und -optimierung durchführen. Dies führt bis hin zu einer weitestgehend automatischen Inbetriebnahme neuer Funkzellen.

Im Zuge der Frequenzuteilung nach §55 des Telekommunikationsgesetzes ist vor Inbetriebnahme von Funkzellen deren exakte Hochfrequenz (HF)-Konfiguration in einem durch die Bundesnetzagentur vorgegebenen Verfahren (Parameterfestsetzung) anzumelden. Grundlage der heutigen Parameterfestsetzung ist eine präventive, wirknetzorientierte und statische Beschreibung der Funkzelle bzw. deren HF-Parameter, mit denen deren Verträglichkeit zu bestehenden Mobilfunksystemen und weiteren Funkdiensten überprüft wird.

In Kooperation mit PreHCM GmbH erarbeitete Herr Schweins die Studie „SmartCoordination“, die sich mit der Thematik auseinandersetzt, inwiefern aktuell praktizierte Verwaltungsverfahren der Parameterfestsetzung konform mit der Flexibilität kommender Mobilfunksysteme sind bzw. diese sogar einschränken. Als plakatives und gut visualisierbares Beispiel wird Massive MIMO in der Studie herausgestellt. Die individuell einstellbaren aktiven Antennensysteme ermöglichen mithilfe von Beamforming die Abstrahlleistung gezielt auf Nutzer auszurichten [BA 19/701]. Die Fokussierung der Abstrahlleistung führt dabei einerseits zu einer deutlichen Verbesserung der Linkbilanz zwischen Basisstation und Mobilfunknutzer und reduziert andererseits die Störungen in andere Abstrahlrichtungen, siehe **Abbildung 13**.

Damit ergeben sich dynamisch verändernde HF-Parameter, die durch das jetzige statische Parameterfestsetzungsverfahren nicht abgebildet werden können.



Abbildung 13: Abstrahlcharakteristiken der auf die jeweiligen Mobilfunknutzer mittels Strahlformung ausgerichteten Antennenkeulen

Im Rahmen der Studie wurden erste Lösungsansätze für ein neues Verfahren beschrieben.

## 5.2 Lokalisierung von Drohnen

Das Einsatzgebiet von Drohnen wird in Zukunft zahlreiche unterschiedliche Aufgaben wie zum Beispiel die Paketzustellung, Einsätze in der Land- und Forstwirtschaft oder auch Such- und Beobachtungseinsätze umfassen. Viele dieser Aufgaben benötigen eine Datenübertragung, wozu 4G- oder 5G-Mobilfunknetze genutzt werden können. Durch ihre exponierte Position weisen Drohnen ein verändertes Verhalten im Vergleich zu Mobilfunknutzern in Bodennähe auf. Sowohl zu ihrer verbundenen Mobilfunkzelle als auch zu den benachbarten Zellen besteht in vielen Fällen direkte Sichtverbindung (engl. line of sight, LOS) was zu einer steigenden Interferenzleistung bei den Nachbarzellen führt. Auf der an-

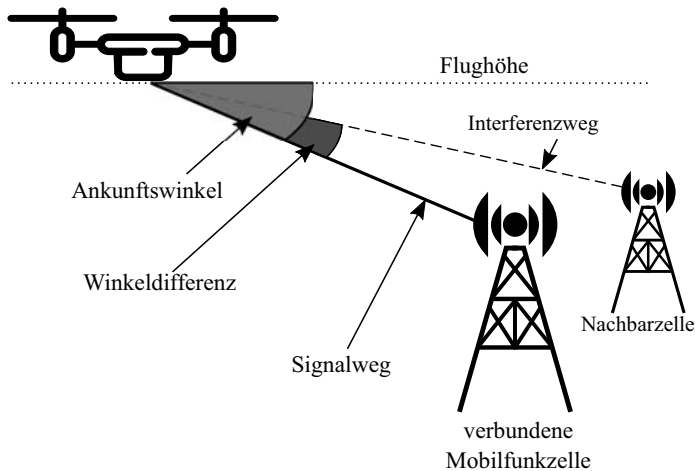


Abbildung 14: Sende-Empfangs-Konfiguration bei einer mit einem Mobilfunkgerät ausgestatteten Drohne

deren Seite ermöglichen die vielen LOS-Verbindungen eine gute Lokalisierung innerhalb des Mobilfunknetzes. Diese kann einerseits dazu verwendet werden, um aus Sicht des Mobilfunkbetreibers die Drohnenposition zu ermitteln, was zum Beispiel zur Kontrolle von Flugzonen verwendet werden könnte, andererseits kann eine Drohne, die mit einem aktiven Antennensystem ausgestattet ist, den Ankunftswinkel des Signals der verbundenen Mobilfunkzelle wie auch die Winkel zu den Nachbarzellen bestimmen, siehe **Abbildung 14**. Aufgrund der Reziprozität des Funkkanals kann diese Information genutzt werden, um mittels Beamforming die Interferenzleistung bei den Nachbarzellen zu verringern und die Linkbilanz zur Mobilfunkzelle zu verbessern.

Im Rahmen eines vierwöchigen Forschungsaufenthalts an der Universität Tampere im April und Mai 2019 hat Herr Schweins Lokalisierungsverfahren für das Beamforming untersucht und in SiMoNe implementiert [SCHW/KÜR1].

### 5.3 Record and Replay

Das Abrufen von Internetdiensten, wie z. B. eines Musikstreams oder Navigationskarten während der Fahrt mit einem Auto wird immer wichtiger. Die wahrgenommene Verbindungsqualität ist für Nutzer relevant und wird mit dem Auto in Verbindung gebracht. So wird z. B. das Herunterstufen der Qualität, das kurzzeitige Aussetzen oder sogar der Abbruch eines Audio- oder Videostreams als

äußert negative Erfahrung wahrgenommen. Dadurch muss bereits während der Entwicklung der Entertainment-Systeme die Reaktion und Toleranz der Steuergeräte gegenüber diversen Ereignissen im Mobilfunknetz getestet werden. Zusammen mit IAV GmbH in Gifhorn wird im Projekt „Record and Replay“ eine Laborumgebung geschaffen, um Mobilfunk-Endgeräte unter beliebig vorgebbaren Bedingungen testen zu können [MA 19/007]. Dabei wird die Auswirkung von verschiedenen Ausbreitungsszenarien und Lastsituationen im Mobilfunknetz untersucht. Um die notwendigen Eingangsdaten realer Mobilfunknetze zu erlangen, werden zwei Ansätze verfolgt. Einerseits können im „Record“-Ansatz grundlegende Mobilfunkparameter, wie z.B. die für das Endgerät aktuell sichtbaren Zell-IDs oder die ermittelte Empfangsleistung, durch Messfahrten aufgenommen werden. Da nicht alle in der Realität vorstellbaren Szenarien mit Hilfe von Messfahrten aufgenommen werden können, sei es z.B. durch nur seltenes Auftreten, werden andererseits die Ausbreitungsbedingungen makroskopisch entlang von vorher definierten Strecken prädiiziert. Auf dieser Basis werden dann grundlegende Mobilfunkparameter und -ereignisse, wie z.B. Handover, simuliert. Die Ergebnisse können anschließend im „Replay“-Labor wiedergegeben und die Reaktionen des zu testenden Steuergerätes beobachtet werden. Damit konnte Herr Thielecke bereits in einigen Szenarien Gründe für gemessene Qualitätseinbußen in der Region um Braunschweig und Gifhorn simulativ aufzeigen und korrekt in der Laborumgebung nachbilden.

## **5.4 Simulation der Bahnversorgung**

Die Versorgung von Mobilfunknutzern in Zügen ist aus vielschichtigen Gründen schwierig. Hohe Geschwindigkeiten, heterogene Umgebungen mit Brücken, Tunneln und Lärmschutzwänden sowie die korrelierte Bewegung von Nutzergruppen sind nur einige der Herausforderungen. Unzulänglichkeiten bei der Versorgung fallen schnell auf, wenn die Teilnehmer ihre Mobiltelefone während der Fahrt außerhalb von Bahnhöfen nutzen. Ein besonderes Augenmerk bekommt die Versorgung von Bahnstrecken auch durch die Auflagen bei der Versteigerung der 5G-Frequenzen im Jahr 2019, da mit dem Erwerb der Frequenzen u.a. Auflagen für die Versorgung von Hauptverkehrswegen erteilt wurden. Die realistischen Mobilitätsmodelle in unserer Simulationsumgebung SiMoNe erlauben die detaillierte Betrachtung von solch speziellen Szenarien in der Mobilfunkversorgung. Im vergangenen Berichtsjahr konnten wir die Erstellung von Szenarien vereinfachen, die Visualisierung der berechneten Ergebnisse weiterentwickeln und die Prädiktion von Empfangsleistungen entlang vorgegebener Pfade, wie z.B. Bahnstrecken oder Autobahnen, deutlich beschleunigen. Im Rahmen zweier Projekte im Auftrag der Beijing Jiaotong Universität bzw. der Deutsche Funkturm GmbH haben Herr Thielecke und Herr Herold die Versorgungs- und Interferenzsituation entlang verschiedener Bahnstrecken in Deutschland, China und

Indonesien für verschiedene Abstände zwischen Basisstationen und Empfangsort auf der Bahnstrecke untersucht.

## **6. Fahrzeug-X-Kommunikation**

### **6.1 Echtzeitfähiges Ray Tracing**

Ein zentrales Problem bei der Simulation von realistischen V2X (Vehicle-to-X)-Szenarien ist die Modellierung des Funkkanals. Auf Grund der Menge an Verkehrsteilnehmern in einem Autobahn- oder innerstädtischen Kreuzungsszenario kam eine strahlenoptische Pfadverlust-Prädiktion hierfür bisher nicht in Frage. Stattdessen werden in wissenschaftlichen Arbeiten oft stochastische Kanalmodelle verwendet [DRE/KÜR2]. Im vergangenen Jahr hat Herr Dreyer große Fortschritte im Bereich der hoch-performanten strahlenoptischen Funkkanalprädiktion für die Fahrzeugkommunikation erzielt [DRE/KÜR3]. Die Arbeiten zielen maßgeblich darauf ab, auch Szenarien mit vielen Kommunikationspartnern simulieren zu können und liefern für kleine Szenarien mit wenigen Teilnehmern Ergebnisse in Echtzeit. Dieser „echtzeitfähige“ Ray Tracer basiert auf einer Vorab-Analyse des Szenarios, bei der die Sichtbarkeits-Beziehung zwischen allen Oberflächen analytisch beschrieben und in einem Suchbaum gespeichert wird. Die Komplexität der Überprüfung, ob zwischen Teilen von Wänden eine direkte Verbindung möglich ist, reduziert sich hierbei auf sehr effiziente Punkt-in-Polygon-Überprüfungen. Ein ähnlicher Suchbaum kann ebenso für Beugungskanten erstellt werden. Mit diesem neuartigen Ansatz kann ein Funkkanal zwischen zwei Teilnehmern in einem innerstädtischen Kreuzungsszenario bei einer Zeitauflösung von einer Millisekunde unter Beachtung von Reflexionen bis zur 2. Ordnung und Beugung bis zur 3. Ordnung auf einem einfachen Laptop in Echtzeit prädiiziert werden. Dieser Ansatz soll im nächsten Schritt um ein neues, in [BA 19/017] entstandenes Modell für die Streuung an inhomogenen Häuserwänden erweitert und mit Messdaten validiert werden.

### **6.2 Simulation der Kommunikation beim LKW-Platooning**

Im Rahmen des BMBF-Projekts 5G-Netzmobil wird eine allumfassende Kommunikationsinfrastruktur für das vernetzte Fahren mit kurzen Latenzen entwickelt. Im Rahmen eines Unterauftrags der Volkswagen AG hat Herr Nan ein Simulationsmodell für einen LKW-Platoon in SiMoNe implementiert und Untersuchungen anhand eines Notbremszenarios auf einer Autobahn durchgeführt. Schwerpunkt der Aktivitäten im Berichtszeitraum war die Erweiterung der Simulationsmodelle auf 5G einschließlich der Numerologie und erster Ansätze zum Network Slicing sowie ein Vergleich der Leistungsfähigkeit von IEEE 802.11p mit den verschiedenen C-V2X-Moden (C-V2X: Cellular Vehicle-to-X) von 4G und 5G. Darüber hinaus wurde ein Vergleich des Einflusses des Kanalmodells auf

die Simulation angestellt. Hierfür wurden ein Ray Tracing Modell sowie das stochastische „Winner+“-Modell untersucht [NAN/SCHW/KÜR1]. Hierbei hat sich herausgestellt, dass für größere Entfernungen zwischen Sender und Empfänger die Simulationsergebnisse hinsichtlich Latenz und Paketfehlerrate bei beiden Modellen vergleichbar sind. Dies legt eine Kombination beider Modelle nahe, bei der für größere Entfernungen auf das stochastische Kanalmodell zurückgegriffen wird.

## 7. THz-Kommunikation

### 7.1 EU-Projekt TERAPOD

Im EU-Projekt TERAPOD beschäftigen wir uns mit der Kanalmodellierung [ECK/DOE/REY/KÜR1], [ECK/DOE/KÜR1], [ECK/DOE/REY/KÜR2] und der Simulation von THz-Funkstrecken in Rechenzentren [ECK/KÜR1]. Im zweiten Projektjahr stand zunächst die Auswertung der Ausbreitungsmessungen, einschließlich der Entwicklung von geeigneten Kalibrierverfahren [MA 19/016], im Vordergrund. Weiterhin stand die Implementierung eines initialen Softwaredemonstrators [ECK1], der die Ergebnisse der verschiedenen Softwaresimulatoren SiMoNe, ns-3 und mininet zusammenführt und visualisiert, im Fokus. Dank der Einbindung des „Helix Toolkit 3D for .NET“ können Umgebungen dreidimensional dargestellt werden, siehe **Abbildung 15**. Der Demonstrator nutzt diese Funktionalität zur Visualisierung eines Rechenzentrums mit 16 Racks, die jeweils mit vier Top-of-Rack-Antennen und einer Glasfaseranbindung ausgestattet sind. Als Funktion der Zeit zeigt der Demonstrator die verschiedenen drahtlosen Inter-Rack-Verbindungen und stellt unterschiedliche Leistungsparameter der Verbindungen grafisch dar. Die finale Version des Demonstrators soll auf das reale Forschungsrechenzentrum von Dell EMC in Cork übertragen werden.

### 7.2 EU-Projekt ThoR

Im Rahmen des EU-Japan-Projekts ThoR [KÜR14], [KÜR19], [KÜR21] haben wir uns im ersten Projektjahr mit Interferenzuntersuchungen als Vorbereitung zur Weltfunkkonferenz 2019 sowie dem Aufbau der Simulationsumgebung für die Simulation von THz-Backhaul/Fronthaul-Funkstrecken befasst. Herr Rey hat die Interferenz zwischen Festnetz-Diensten und dem passiven Satelliten-Erderkundungsfunkdienst untersucht [REY1]. Die Studie hat gezeigt, dass insgesamt 138 GHz im Frequenzbereich zwischen 275 und 450 GHz für eine störungsfreie Koexistenz zwischen beiden Funkdiensten geeignet sind. Basierend auf den Anforderungen an die in ThoR geplante 300-GHz-Backhaul-Funkstrecke [KÜR23] hat Herr Jung federführend an der Definition der Simulationsszenarien (in Hannover, Berlin, Tokio-Shinjuku) [JUNG/KÜR1] mitgewirkt und das Simulationskonzept erstellt [JUNG/ECK/DRE/KÜR1]. Be-

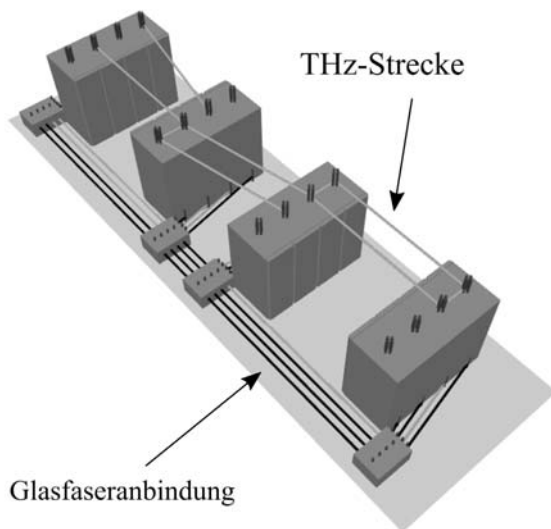


Abbildung 15: Visualisierung der THz-Datenverbindungen in einem Rechenzentrum

reits im Rahmen seiner Masterarbeit [MA 19/004] hat Herr Jung einen Algorithmus zur automatisierten Planung von THz-Backhaul-Funkstrecken entwickelt, mit dem es möglich ist, neue Basisstationen in einem ultra-dichten Netz so anzubinden, dass möglichst wenige Basisstationen eine Glasfaseranbindung benötigen. Der Algorithmus berücksichtigt sowohl die für die Funkausbreitung bei 300 GHz relevanten Wetterbedingungen als auch mögliche Interferenzen zwischen den 300-GHz-Funkstrecken [JUNG/ECK/DRE/KÜR2], [JUNG1], [JUNG/DRE/ECK/KÜR1]. Im Simulationsszenario Hannover, siehe **Abbildung 16**, mit der Annahme einer ultradichten Netzstruktur, wie sie z. B. mit Zugangspunkten im Millimeterwellenbereich zukünftig aussehen könnte, benötigen nur ungefähr 12 % der neu anzubindenden Basisstationen eine Glasfaseranbindung.

### 7.3 Metrologie für die THz-Kommunikation (DFG FOR 283 Meteracom)

Im Juli 2019 hat der DFG-Senatsausschuss die Forschungsgruppe Meteracom bewilligt, siehe auch der Sonderbericht auf S. 115. Meteracom befasst sich mit Messverfahren für die THz-Kommunikation, mit der zukünftig ultrahohe Daten-





Abbildung 16: Automatisiert ermittelte THz-Funkstrecken im Simulationsszenario Hannover für eine angenommene ultradichte Netzstruktur

raten mit bis 1 Tbit/s im Frequenzbereich oberhalb von 300 GHz erreicht werden können. Zusammen mit insgesamt 10 Kolleginnen und Kollegen aus sechs Universitäten in Deutschland sowie den nationalen Metrologieinstituten in Deutschland (Physikalisch-Technische Bundesanstalt – PTB) und Großbritannien (National Physics Laboratory – NPL) werden Herausforderungen der Metrologie für die THz-Kommunikation systematisch auf den folgenden vier Gebieten untersucht [KÜR12]: (i) Rückführbarkeit auf das Internationale SI-Einheitensystem, (ii) Charakterisierung des Messsystems selbst, (iii) metrologische Charakterisierung der Hochfrequenzkomponenten und des Ausbreitungskanals und (iv) Messungen, die für die Gewährleistung der Funktionalität des eigentlichen THz-Kommunikationssystems benötigt werden. Das Projekt ist in neun fachliche Teilprojekte sowie ein Koordinationsprojekt gegliedert. Die Abteilung Mobilfunksysteme ist an vier der neun fachlichen Teilprojekte beteiligt, die von Herrn Herold

und Herrn Doeker bearbeitet werden. Prof. Kürner ist Sprecher der Forschungsgruppe und leitet das Koordinationsprojekt. Einer der Schwerpunkte im ersten Projektjahr wird das Thema „Device Discovery“ sein, bei dem wir auf einschlägige Vorarbeiten aus einem früheren Projekt zurückgreifen können [REY/KÜR1].

#### **7.4 THz-Kommunikation für V2X**

Im Rahmen der Seed-Funding-Initiative zwischen der Universität Tampere und der Technischen Universität Braunschweig fand ein Austausch von zwei Wissenschaftlichen Mitarbeitern für jeweils einen Monat statt (s. auch Abschnitt 5.2). Gemeinsam mit Vitaly Petrov von der Universität Tampere wurde dabei in Kooperation mit dem Niedersächsischen Forschungszentrum Fahrzeugtechnik (NFF) eine einwöchige Messkampagne durchgeführt, deren Ziel es war, den Einsatz von THz-Kommunikation in zukünftigen Anwendungen der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation zu erforschen. Dabei wurden unterschiedliche Szenarien im Straßenverkehr nachgestellt und der Einfluss und die Eigenschaften in Bezug auf Reflexion, Transmission, Streuung und Beugung an einem Testfahrzeug mit dem institutseigenen Channel Sounder bei 300 GHz gemessen. Das Fahrzeug hatte dabei großen Einfluss auf den Mobilfunkkanal, da es zum einen eine geringe Transmission zulässt und zum anderen in gewissen Bereichen stark reflektiert. In **Abbildung 17** sind die Veränderung der Winkel der reflektierten Signale sowie das Auftreten weiterer Reflektionen mit zunehmender Entfernung  $d$  der beiden kommunizierenden Fahrzeuge zu sehen. Erste Ergebnisse wurden bei der IEEE 802 Plenary in Wien im Juli 2019 vorgestellt [ECK/KÜR2].

#### **7.5 Nanokommunikation**

Fortschritte auf dem Gebiet der Nanotechnologie eröffnen zukünftig die Möglichkeit, mit kleinsten Kommunikationsknoten in biologischen Systemen Messungen durchzuführen und die Ergebnisse mittels Nanokommunikation nach außen zu kommunizieren. Die Nanoknoten haben dabei die Größe zwischen mehreren hundert Nanometer und einem Mikrometer. Durch die kleine Größe der Komponenten und der Antennen bietet sich der THz-Frequenzbereich für die drahtlose Übertragung an. Durch die hohe Funkausbreitungsdämpfung in diesem Frequenzbereich speziell in biologischen Systemen einerseits und die starke Miniaturisierung andererseits ergeben sich große Herausforderungen für die Realisierung des Kommunikationssystems. Hierzu gehören auch die Verfahren für die Bereitstellung der notwendigen Energie für die Übertragungsknoten. Herr Indrawijaya untersucht im Rahmen eines deutsch-indonesischen Forschungsprojekts die Machbarkeit von derartigen Nanokommunikationssystemen auf der Basis theoretischer Überlegungen und eigener Simulationen.

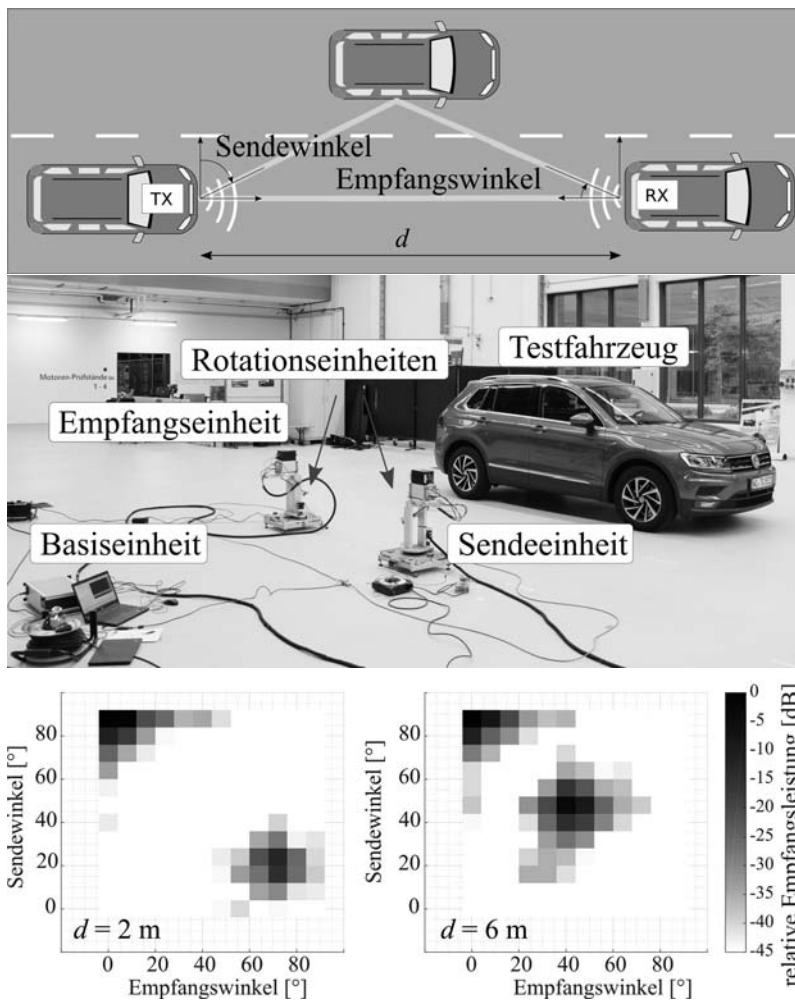


Abbildung 17: Schematische Darstellung des vermessenen Szenarios für die THz Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation (oben); Messaufbau mit Fahrzeug und Channel Sounder (Mitte); gemessene Dämpfung als Funktion der Abstrahlwinkel am Sender und des Ankunftswinkels am Empfänger für verschiedene Fahrzeugabstände  $d$  (unten)

## 7.6 Regulierung und Standardisierung

Auch in diesem Jahr haben wir uns aktiv in die Regulierung und Standardisierung von THz-Kommunikationssystemen eingebracht [KÜR16], [KÜR8]. Im Vordergrund standen dabei Verträglichkeitsuntersuchungen mit den passiven Systemen der Erdbeobachtungssatelliten, die Herr Rey im Rahmen des EU-Projekts ThoR durchgeführt hat (siehe auch Abschnitt 7.2). Die Ergebnisse wurden sowohl in die nationale Vorbereitungsgruppe für die WRC 2019 [REY2] als auch in die Standardisierung bei IEEE 802 eingebracht [REY/KÜR2]. Weitere Ergebnisse aus den EU-Projekten ThoR und TERAPOD wurden in verschiedenen Standardisierungsgremien [KÜR25], [KÜR24] zur Verfügung gestellt.

## Neu am IfN: Prof. Dr.-Ing. Eduard Axel Jorswieck

An dieser Stelle möchte ich mich als neuer Kollege am Institut für Nachrichtentechnik vorstellen. Seit 1. August 2019 leite ich die Abteilung „Informationstheorie und Kommunikationssysteme“ am IfN an der TU Braunschweig. Das Institut ist mit seinen drei Abteilungen für Elektronische Medien: Systemtheorie und Technik, Mobilfunksysteme und Signalverarbeitung und Machine Learning sehr solide, forschungstark und sichtbar aufgestellt. Meine neue Abteilung wird für ein halbes Jahr bis Sommer 2020 mit der Abteilung für Elektronische Medien: Systemtheorie und Technik koexistieren. Anschließend werden die langjährigen und erfolgreichen Arbeiten in den Bereichen der Kooperationsmodelle zwischen Broadband und Broadcast sowie Further Evolved Multimedia Broadcast Multicast Service fortgeführt und um die neuen Arbeitsgebiete Sicherheit auf der Übertragungsschicht, zelluläre Kommunikationssysteme, drahtlose lokale und Körper-Netzwerke ergänzt. Meine Abteilung folgt einem holistischen Systemansatz von den Grundlagen der Informationstheorie über den systematischen Systementwurf bis hin zur prototypischen Demonstration.



Ich wurde 1975 in Berlin-Zehlendorf geboren und begann mich schon mit 10 Jahren für die ersten Home-Computer zu begeistern (damals ein Atari 800 XL). Später folgte nach einem kurzen Pflichtaufenthalt im Fernmeldezug der Bundeswehr in Lehnitz das Studium der Technischen Informatik an der TU Berlin, das 2000 mit einer Diplomarbeit bei Professor Peter Noll abgeschlossen wurde. Die Arbeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer Institut für Nachrichtentechnik (damals noch Heinrich-Hertz-Institut) mündete 2004 in einer Promotion (mit Auszeichnung) zum Thema Optimierung von Ein- und Mehrbenutzer-Mehrantennen-Systemen, betreut von Professor Holger Boche. Der Zweitgutachter Professor Björn Ottersten lud mich an die KTH Stockholm in die Abteilung für Signalverarbeitung ein, wo ich von 2006 bis 2008 als Post-Doktorand und dann Assistant Professor lehren und forschen konnte.

Von 2008 bis 2019 leitete ich die Professur für Theoretische Nachrichtentechnik am Institut für Nachrichtentechnik an der TU Dresden, das aus dem ältesten Institut für Schwachstromtechnik Deutschlands entstand, und konnte dort Erfahrungen als Principal Investigator im Sonderforschungsbereich HAEC und den Exzellenzclustern Center for Advancing Electronics Dresden (cfAED) und Center for Tactile Internet (CeTI) sowie mit einem Forschungstransfer-Projekt, das ein Startup hervorbrachte, sammeln. In dieser Zeit wurden 11 Doktoranden erfolgreich promoviert, zwei weitere werden Anfang nächsten Jahres an der

TU Dresden abschließen und verteidigen. Vier andere Doktoranden sind mir mit den DFG-Projekten an die TU Braunschweig gefolgt und stellen sich Ihnen auf den kommenden Seiten vor. Ein neuer Wissenschaftlicher Mitarbeiter hat auch gerade angefangen.

Meine Forschungsinteressen liegen in den Bereichen angewandte Informationstheorie, digitale Signalverarbeitung für Kommunikationssysteme und Netzwerke sowie Optimierungs- und Spieltheorie für Ressourcen-Vergabe in Netzwerken. Gemeinsam mit Koautoren habe ich drei Monographien, über 110 Journal-Paper (überwiegend in IEEE Transactions und Journals), mehr als 275 Konferenz- und Workshopbeiträge, 13 Buchkapitel und 5 Patente veröffentlicht. Besonders freue ich mich über den IEEE Signal Processing Best Paper Award von 2006 und die Best Student und Best Paper Awards bei acht internationalen Konferenzen und Workshops, die ich gemeinsam mit Kollegen und Doktoranden gewinnen konnte.

In der internationalen wissenschaftlichen Gemeinschaft, konkret in der IEEE Communications und IEEE Signal Processing Society, bringe ich mich gerne ein: 2008-2011 als Associate Editor bei IEEE Signal Processing Letters, dann 2011-2013 als Senior AE. Von 2011 bis 2015 als Associate Editor bei den IEEE Transactions on Signal Processing, von 2013 bis 2018 als Editor bei den IEEE Transactions on Wireless Communications und seit 2015 als Associate Editor bei den IEEE Transactions on Information Forensics and Security. Von 2008 bis 2013 war ich gewähltes Mitglied des Technischen Komitees der IEEE Signal Processing Society / Signal Processing for Communications and Networking und seit 2015 gewähltes Mitglied des Sensor Array and Multi-Channel Technischen Komitees der IEEE Signal Processing Society.

Zur Stärkung der europäischen Forschungsgemeinde unterstütze ich die europäische Vereinigung für Signalverarbeitung EURASIP. Seit 2017 bin ich Editor-in-Chief des Springer EURASIP Journals on Wireless Communications and Networking. Auf nationaler Ebene arbeite ich in VDE/ITG-Gremien und Fachausschüssen: im Moment als gewähltes Mitglied des ITG-Fachausschusses KT1 für angewandte Informationstheorie.

Ich möchte mich an dieser Stelle für die herzliche Aufnahme durch alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter und Kolleginnen und Kollegen am Institut bedanken. Die letzten vier Monate konnte ich die freundliche und konstruktive kollegiale Atmosphäre am Institut wahrnehmen. Mein Ziel für die kommenden 23 Jahre besteht, neben hervorragender universitärer Lehre und Forschung in der Abteilung für Informationstheorie und Kommunikationssysteme darin, diese Atmosphäre am IfN, das aus dem zweitältesten Institut für Schwachstromtechnik Deutschlands hervorgegangen ist, zu erhalten und auszubauen. Ich freue mich auf die Zusammenarbeit!

## Personelle Veränderungen

Im ablaufenden Jahr konnten wir die folgenden neuen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter begrüßen, die sich anschließend mit Foto und kurzem Text selbst vorstellen:

Name	Berufsbezeichnung	Einstellungsdatum
Jonas von Beöczy	wiss. Mitarbeiter	01.01.2019
Marvin Klingner	wiss. Mitarbeiter	01.03.2019
Jan Baumann	wiss. Mitarbeiter	01.04.2019
Bo Kum Jung	wiss. Mitarbeiter	01.04.2019
Christoph Herold	wiss. Mitarbeiter	01.07.2019
Karl-Ludwig Besser	wiss. Mitarbeiter	01.08.2019
Carsten Janda	wiss. Mitarbeiter	01.08.2019
Dr. Pin-Hsun Lin	wiss. Mitarbeiter	01.08.2019
Andrew Lonnstrom	wiss. Mitarbeiter	01.08.2019
Jasmin Breitenstein	wiss. Mitarbeiterin	01.10.2019
Sepehr Rezvani	wiss. Mitarbeiter	22.10.2019
Tobias Doeker	wiss. Mitarbeiter	01.11.2019

---

**Marvin Klingner:** Ich wurde am 12. November 1994 in Langenhagen geboren und habe im Jahr 2012 mein Abitur an der Wilhelm-Raabe-Schule Hannover gemacht. Mein Studium erfolgte an der Georg-August-Universität in Göttingen, wo ich von 2013 bis 2018 Bachelor und Master im Fach Physik absolviert habe. Hier lag mein Schwerpunkt auf der Physik komplexer Systeme. Über die Neurophysik bin ich schließlich zu meiner Masterarbeit über neuronale Netzwerke gekommen. Diese beschäftigte sich mit der Prädiktion von Zukunftsszenen aus Einzelbildern. Motiviert durch die Nähe zur Industrie habe ich im März 2019 meine Tätigkeit am Institut für Nachrichtentechnik der TU Braunschweig in der Abteilung Signalverarbeitung und Machine Learning begonnen, wo ich mich mit neuronalen Netzwerken in der Bildverarbeitung beschäftige. In meiner Freizeit gehe ich meistens Bouldern oder Beachvolleyball spielen, probiere aber auch gerne andere Dinge mal aus, wie neuerdings Bierbrauen.



**Jonas von Beöczy [bø:tsi]:** Am 31. Oktober 1989 erblickte ich das Licht der Welt in der schönen Stadt Goslar. Dort machte ich 2011 mein Abitur und ging im selben Jahr nach Hamburg, um als Quereinsteiger im Einkauf einer Klinik zu arbeiten. In dem Zeitraum lernte ich jemanden kennen, der gerade seine Ausbildung zum Mechatroniker abschloss. Die Basteleien in seiner Werkstatt weckten mein Interesse an der Elektrotechnik und so begannen wir zusammen im Winter 2012 ein Studium der Informations- und Elektrotechnik an der HAW Hamburg. 2016 beendeten wir unser Bachelorstudium und ich zog im selben Jahr nach Braunschweig, um hier ein Masterstudium an der TU Braunschweig zu beginnen. 2018 schloss ich das Studium ab und seit Januar 2019 arbeite ich in der Abteilung Elektronische Medien, wo ich im Bereich 5G Broadcast Automotive forsche. Meine Freizeit verbringe ich überwiegend in den Parks und Feldern in und um Braunschweig herum, am Ölper See, auf den hiesigen Sportanlagen oder im Harz.



**Jan Baumann:** Ich wurde am 25. Juni 1993 in Hamburg geboren. Mein Abitur mit naturwissenschaftlichem Schwerpunkt legte ich 2012 in Lübeck ab. Anschließend zog es mich zum Studium der Elektrotechnik nach Braunschweig, wo ich während des Bachelorstudiums mein Interesse an nachrichtentechnischen Themen entdeckte, so dass ich im Masterstudium die Kommunikationstechnik vertiefte. In meiner Masterarbeit untersuchte ich die „Turbo-Fusion“ von Spracherkenner-Ensembles, wobei sich insbesondere meine Begeisterung für Forschung an der Schnittstelle von Akustik und Machine Learning entwickelte. Seit April 2019 arbeite ich als Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Signalverarbeitung und Machine Learning in einem Projekt zur akustischen Fahrzeugdiagnose. Ich beschäftige mich seither mit der Detektion und Klassifikation von akustischen Events. In meiner Freizeit fahre ich gerne Fahrrad oder setze ich mich mit der Konstruktion und Optimierung von HiFi-Systemen auseinander.





**Bo Kum Jung:** Ich wurde am 20. Januar 1991 in Busan, Südkorea geboren. Im März 2009 begann ich mein Bachelorstudium in Electrical Engineering, das ich im August 2015 abschloss. Während meines Studiums leistete ich von 2010 bis 2012 die Wehrpflicht ab. Das Wintersemester 2013/2014 und das Sommersemester 2014 verbrachte ich als Auslandssemester an der FH Wien. Zum Wintersemester 2016/2017 begann ich das Masterstudium an der TU BS mit dem Schwerpunkt Nachrichtentechnik. Während meines Masterstudiums wurde ich auf allgemeine Mobilfunksysteme aufmerksam und interessierte mich für neue Kommunikationsanwendungen in der Hochfrequenz. Das Team und die Arbeitsatmosphäre gefielen mir gut. Deshalb wollte ich meine akademische Laufbahn am IfN weiterführen. Seit April 2019 bin ich Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Mobilfunksysteme. In der Freizeit reise ich gerne, um neue Orte zu entdecken und andere Länder, andere Lebensart und Kultur zu erleben.



**Christoph Herold:** Ich wurde am 4. November 1990 in Lemgo geboren. In meiner Heimatstadt Barntrup bin ich aufgewachsen und bis zum Abitur 2010 auch dort zur Schule gegangen. Während eines Schüleraustausches in den USA und eines Freiwilligen Sozialen Jahres in Costa Rica konnte ich interkulturelle Erfahrungen sammeln. Im Jahr 2011 begann ich mein Studium der Informationssystemtechnik an der TU Braunschweig und beendete es 2019. Während des Studiums habe ich zwei Semester an der Chalmers Tekniska Högskola in Göteborg studiert und ein Industriepraktikum bei der schwedisch-chinesischen Firma CEVT absolviert. Meine Bachelor- und Masterarbeit habe ich am IfN geschrieben. Seit Juli 2019 arbeite ich als Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Mobilfunksysteme und beschäftige mich mit der Simulation von Terahertz-Funkkanälen. In meiner Freizeit laufe ich gerne und spiele Badminton in einem Verein.



**Carsten Janda:** Ich wurde am 25. März 1985 in Hannover geboren. Meine allgemeine Hochschulreife erwarb ich 2004 am Erich Kästner Gymnasium Laatzen. Den akademischen Titel Diplom-Ingenieur erhielt ich 2011 von der TU Dresden. Von März 2013 bis einschließlich Juli 2019 war ich Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Theoretische Nachrichtentechnik am Institut für Nachrichtentechnik der TU Dresden. Seit August 2019 freue ich mich, als Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Informationstheorie und Kommunikationssysteme Mitglied des Instituts für Nachrichtentechnik an der TU Braunschweig zu sein. In meiner Freizeit spiele ich gerne Volleyball und Badminton und verbringe Zeit mit meinen Freunden.



**Pin-Hsun Lin:** Ich wurde am 13. Februar 1978 in Taipeh, Taiwan, geboren. Ich erhielt den B.S. im Jahr 2000 in Elektrotechnik an der National Taiwan University (NTU) in Taipei, Taiwan. Danach habe ich 4 Jahre lang am Graduate Institute of Electrical Engineering an der NTU Basisband-Schaltungsdesign studiert. Dann wechselte ich an das Graduate Institute of Communications Engineering der NTU und promovierte 2010 mit der Dissertation „Cognitive Radio in Fading Channels: From Gel'fand Pinsker Coding to Receiver Cooperation.“ Ab 2014 war ich Post-Doctoral Associate am Communications Theory Lab der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Dresden. Seit dem 1. August 2019 bin ich in der Abteilung für Informationstheorie und Kommunikationssysteme der Technischen Universität Braunschweig tätig. Meine aktuelle Forschung konzentriert sich auf die Gestaltung und Analyse von Sicherheits- und Datenschutzfragen für die Kommunikation sowie auf die Kapazitätsanalyse von Kanälen mit ausschließlich statistischer Kanalzustandskenntnis am Sender. In meiner Freizeit genieße ich es, meine Familie zu begleiten, Lego zu spielen, Geschichten zu erzählen und mit meinen Kindern Fahrrad zu fahren.



**Andrew Lonnstrom:** Ich wurde am 30.04.1975 in Rochester Hills, Michigan, USA geboren. Meinen Bachelor of Science in Electrical Engineering habe ich an der Kettering University in Flint, Michigan, im Jahr 2000 erworben. Von 2000 bis 2002 arbeitete ich als Entwicklungsingenieur für den 3G-Chipsatz bei der Infineon Technologies AG in München. Im Oktober 2002 bin ich für ein Master-Studium nach Dresden gezogen. Dieses habe ich im Januar 2005 an der TU Dresden erfolgreich abgeschlossen. Von August 2005 bis Dezember 2007 war ich bei der Actix GmbH (vormals Radioplan GmbH) als Support Engineer für die Funknetzplanung und -optimierung tätig. Anschließend arbeitete ich von Januar 2008 bis August 2010 als Entwicklungs- und Vertriebsingenieur für LTE Test UEs (user equipment) bei der Signalion GmbH. Von September 2010 bis Februar 2016 arbeitete ich als Entwicklungs- und Prüfingenieur bei Intel im Bereich Performance Testing für ihren LTE-Modem-Chipsatz. Im September 2016 wechselte ich an die TU Dresden, um dort bis Juli 2019 als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Theoretische Nachrichtentechnik am Institut für Nachrichtentechnik zu arbeiten. Seit August 2019 bin ich Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung für Informationstheorie und Kommunikationssysteme des IfN an der TU Braunschweig. In meiner Freizeit spiele ich gerne Klavier und verbringe viel Zeit mit meinen beiden Kindern.



**Karl-Ludwig Besser:** Ich wurde am 16. August 1994 in Leipzig geboren. Dort erwarb ich im Juli 2012 am Humboldt-Gymnasium mein Abitur. Anschließend begann ich das Studium im Bereich Elektrotechnik an der Technischen Universität Dresden, welches ich im Sommer 2018 mit einem Diplom abschloss. Ab August 2018 war ich als Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Dresden angestellt. Ein Jahr später habe ich an die TU Braunschweig gewechselt, an der ich seit August 2019 in der Abteilung für Informationstheorie und Kommunikationssysteme des IfN tätig bin. In meiner Freizeit bin ich häufig auf dem Tennisplatz anzutreffen.



**Jasmin Breitenstein:** Ich wurde am 25. November 1992 in Kassel geboren. Ein Jahr später zogen wir nach Berlin, wo ich aufgewachsen bin und 2012 mein Abitur gemacht habe. Direkt im Anschluss habe ich begonnen, an der Technischen Universität Berlin Mathematik zu studieren. Nach meinem Bachelorabschluss im Sommer 2016 begann ich mein Masterstudium mit einem Auslandsaufenthalt in den Niederlanden. In den Vorlesungen dort und einem anschließenden Praktikum kam ich das erste Mal mit Machine-Learning-Themen in Berührung. Zurück in Berlin habe ich meine Masterarbeit am Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut und der TU Berlin geschrieben. Die Erfahrungen dort und während meines Praktikums haben mich in meiner Entscheidung bestärkt, weiterhin an der Universität bleiben zu wollen. Im Oktober 2019 habe ich in der Abteilung Signalverarbeitung und Machine Learning des IfN als Wissenschaftliche Mitarbeiterin angefangen und beschäftige mich mit Methoden zur maschinellen Wahrnehmung für das autonome Fahren. Seit einigen Jahren mache ich regelmäßig Yoga und spiele gerne Beachvolleyball.



**Tobias Doeker:** Am 10. Juni 1994 erblickte ich im Krankenhaus in Haltern das Licht der Welt und bin in Dülmen im Münsterland aufgewachsen. Für ein duales Studium in Kooperation mit der Lufthansa Technik AG an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) Hamburg zog es mich in die schöne Stadt an der Alster und Elbe. Dort schloss ich mein Bachelorstudium im Frühjahr 2017 ab. Für das Masterstudium wechselte ich dann an die TU Braunschweig, wobei ich weiterhin in den Semesterferien bei der Lufthansa Technik in Hamburg tätig war. Während meines Masterstudiums arbeitete ich bereits als HiWi am IfN in der Abteilung Mobilfunksysteme im Bereich der THz-Kommunikation. Diesem Themengebiet bin ich seitdem über meine Masterarbeit und meiner seit November 2019 bestehenden Anstellung als Wissenschaftlicher Mitarbeiter weiterhin verbunden. Abseits dessen reise ich sehr gerne und verbringe viel Zeit mit Familie und Freunden. Außerdem begeistert mich die Fotografie und ich halte mich mit Laufen und Schwimmen fit.



**Sepehr Rezvani:** I was born on May 5th, 1992 in Galugah, Mazandaran, Iran. From September 2010 to July 2015, I studied at Shiraz University of Technology and received the Bachelor's degree in the field of Electrical Engineering – Communication Systems. Then, I started my Master Program at the faculty of Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Mo-dares University, Tehran, Iran, in September 2015 and received my Master's degree in the field of Elec-trical Engineering – Communication Systems in De-cember 2017. In October 2019, I started my Ph.D. program funded by the Deutsche Forschungsgemein-schaft (DFG) project at the Department of Informa-tion Theory and Communication Systems, Techni-sche Universität Braunschweig. Now, I am working as a research associate and pursuing my Ph.D. de-gree at the Department of Information Theory and Communication Systems, IfN, Technische Universi-tät Braunschweig. My research topic is resource allo-cation optimization in software-defined wireless net-works. My hobbies are playing the music (cittern), watching news and sports events, and travelling.



Wir bedanken uns bei den folgenden Mitarbeitern, die uns im Berichtszeitraum verlassen haben, für die gute Zusammenarbeit und wünschen ihnen für den wei-teren Lebensweg alles Gute:

Name	Berufsbezeichnung	Beschäftigungszeitraum
Sebastian Rey	wiss. Mitarbeiter	01.08.2012 – 31.12.2018

## Jubiläen und persönliche Ereignisse

Name	Datum	Anlass
Eike-Asslo Erichsen-Rua	01.02.2019	45 Jahre Öffentlicher Dienst
Petra Beyer	12.02.2019	60. Geburtstag
Eike-Asslo Erichsen-Rua	19.02.2019	65. Geburtstag
Peter Schlegel	27.02.2019	25 Jahre Öffentlicher Dienst
Rudolf Görke	22.06.2019	65. Geburtstag
Boguslaw Brandt	08.08.2019	65. Geburtstag

## Alumni-Nachrichten

• Nachdem ich 2011 das IfN verlassen habe, um den Quereinstieg ins Lehramt zu wagen, ist viel passiert. Ich habe mein Referendariat für die Fächer Mathematik und Informatik abgeschlossen und konnte an meiner Ausbildungsschule, dem Gymnasium im Schloss in Wolfenbüttel, bleiben. Ich wurde Fachsprecher für Informatik und durfte mittlerweile sogar an der Erstellung der Niedersächsischen Abituraufgaben mitwirken. Seit 2017 bin ich als schulfachlicher Koordinator an meiner Schule u.a. für das Abitur zuständig.



Ich unterrichte fast ausschließlich Informatik, von der Roboter-AG über IT-Profilklassen bis hin zum Leistungskurs. Viele meiner ehemaligen Abiturienten studieren nun selber Informatik, E-Technik oder IST. Einige sind mittlerweile sogar beim IfN aufgetaucht, was mich natürlich besonders freut, da ich selbst so viele positive Erinnerungen damit verbinde.

Auch privat war und wird es nie langweilig. So bin ich seit sechs Jahren verheiratet und bewohne mit meiner Frau und meinen Söhnen Theodor (5) und Jonathan (2) mittlerweile ein eigenes Haus mit großem Garten im beschaulichen Wolfenbüttel.

Viele Grüße  
Frithjof Hummes

• Im Berichtszeitraum 2018-2019 ereignete sich für mich als Entwicklungsingenieur einiges Außergewöhnliches. Im Dezember bestand ich eine Diplomprüfung

in 'Management Technologique et Innovation' an einer französischen 'Grande École' in Grenoble (GEM – Grenoble École de Management). So stolz wie ich auf mein erstes französisches Diplom war, um meiner internationalen Erfahrung Ausdruck zu verleihen, so ernüchternd war der erste Effekt. Auf der Suche nach einer interessanten neuen Aufgabe bei renommierten Firmen erhielt ich eindrucksvolle Absagen: „Sie sind überqualifiziert“ oder „Sie sind zu kreativ“. Das ließ ich mir nicht zweimal sagen und – ja, was denn wohl – machte mich auf den Weg, meine erste eigene Firma in Frankreich zu gründen. Sie heißt FLY-CE-SAI SOLUTIONS und ist seit November 2019 aktiv (flycesai.com). So spürte ich den zweiten Effekt – „wie neugeboren“ – Firmengründer, Geschäftsführer und President (als Angestellter, nicht als Selbständiger), das alles zusammen in einer Person!

Begeistert war ich auch über meinen IfN Kurzbesuch im Mai, bei dem ich nicht nur mit vielen Alteingesessenen IfNlerInnen plauderte und in faszinierenden Erinnerungen schwelgte ('FröbelFritz'), sondern auch mit enthusiastischen jungen wissenschaftlichen Mitarbeitern über neue Systemarchitekturen zur künstlichen Intelligenz sehr anregend diskutierte. Allen zusammen wünsche ich ein freudebringendes Jahr 2020!

Tschüß, à bientôt, take care,  
Euer Fritz LEBOWSKY

- Hejhej, Familie Rother ist um ein Mitglied größer geworden. Am 4. Dezember 2018 um 04:50 Uhr ist unsere Tochter Finja Linnea (3030g, 51cm) zur Welt gekommen. Inzwischen haben wir uns gut an das Leben zu viert gewöhnt und verbringen gerade unsere Elternzeit in Bali, Neuseeland und Singapur.

Viele Grüße  
Familie Rother

## **Neue DFG-Forschungsgruppe „Metrology for THz Communications“**

In der Informationstechnik steigen die Datenübertragungsraten stetig an, da der Bedarf für eine schnelle drahtlose Datenkommunikation ebenfalls rasant wächst. Um Geschwindigkeiten von 100 Gigabit pro Sekunde und höher technisch zu ermöglichen, wird ein neuer Ansatz in der Kommunikationstechnik benötigt. Diesem Thema widmet sich die Forschungsgruppe „Metrology for THz Communications“ mit Prof. Thomas Kürner von der Technischen Universität Braunschweig als Sprecher. Die Forschungsgruppe ist eine von zehn neuen Gruppen, die die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) eingerichtet hat und für zunächst drei Jahre fördert. Die neuen Verbünde erhalten insgesamt rund 47 Millionen Euro. Im Zentrum von „Metrology for THz Communications“ steht die Kommunikationstechnik für den weitgehend noch unberührten Terahertz-Frequenzbereich (THz). In diesem Frequenzbereich könnte in Zukunft 1 Terabit pro Sekunde übertragen werden. Jedoch stellt er die heutige Kommunikationstechnik vor enorme Herausforderungen. Die DFG unterstützt diese Forschung mit insgesamt 2,6 Millionen Euro. Prof. Kürner: „Die Möglichkeit, präzise Messungen in dem anspruchsvollen Frequenzbereich oberhalb von 300 GHz bei gleichzeitig sehr hohen Bandbreiten durchzuführen und auszuwerten, bildet eine wesentliche Grundlage für die zukünftige Entwicklung und Implementierung von THz-Kommunikationssystemen. Mit der Forschungsgruppe Meteracom werden wir in der Lage sein, einen wichtigen Beitrag hierfür zu leisten“.

Ein wesentlicher Aspekt zur Erreichung der hohen Datenraten sind die oberhalb von 300 GHz verfügbaren Bandbreiten von einigen 10 GHz. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der TU Braunschweig und der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) beschäftigen sich seit über zehn Jahren mit der THz-Kommunikation und waren auch federführend an der Entwicklung des weltweit ersten drahtlosen Kommunikationsstandards für 300 GHz beteiligt. Die Forschungsgruppe Meteracom beschäftigt sich mit der Metrologie für die zukünftigen THz-Kommunikationssysteme und will unter anderem Messverfahren konzipieren, die die Leistungsfähigkeit der THz-Kommunikation in realen Umgebungen vorherzusagen helfen. In den insgesamt zehn Teilprojekten der neuen DFG-Forschungsgruppe werden alle Aspekte der Messtechnik betrachtet: ausgehend von der Rückführbarkeit von Messungen auf Vergleichsnormale, den Verfahren zur Charakterisierung der Messsysteme selbst, den spezifischen Messverfahren zur Charakterisierung der Komponenten der Kommunikationssysteme und des Übertragungskanal sowie der für den späteren Betrieb der THz-Kommunikationssysteme benötigten Messungen.

Neben Prof. Kürner sind beteiligt Frau Prof. Admela Jukan vom Institut für Datentechnik und Kommunikationsnetze und Prof. Thomas Schneider vom In-





**Die Meteracom-Antragsteller/innen am Tag vor der erfolgreichen  
Vor-Ort-Begutachtung am 21. Februar 2019**

(v.l.n.r.: Dr. David Humphreys, Robert Müller (in Vertretung für Prof. Reiner Thomä),  
Prof. Admela Jukan, Prof. Thomas Kürner, Prof. Martin Koch, Prof. Ingmar Kallfass,  
Prof. Thomas Schneider, Dr. Thomas Kleine-Ostmann, Prof. Christoph Scheytt,  
Prof. Mladen Berekovic)

stitut für Hochfrequenztechnik der TU Braunschweig sowie Dr. Thomas Kleine-Ostmann von der PTB. Die vorhandene Kompetenz und die gerätetechnische Ausstattung am Standort Braunschweig werden durch fünf weitere Professoren aus Paderborn, Marburg, Stuttgart, Lübeck und Ilmenau sowie einem Mercator-Fellow vom National Physics Laboratory, dem britischen Pendant zur PTB, ergänzt.

(Gekürzte Version der Pressemitteilung der TU Braunschweig vom 11.07.2019)

## **Best Paper Award für Prof. Eduard Jorswieck und Dr. Pin-Hsun Lin bei der ISWCS 2019**

Im Rahmen des 16. Internationalen Symposiums für drahtlose Kommunikationssysteme (iswcs2019.org) (das von der IEEE Communications Society, IEEE Vehicular Communications Society und European Association for Signal Processing (EURASIP) mit-unterstützt wird), welches vom 27. bis 30. August 2019 in Oulu, Finnland stattfand, wurde der Beitrag mit dem Titel „Ultra-Reliable Multi-Connectivity With Negatively Dependent Fading Channels“ [JOR/LIN1] mit dem Best Paper Award ausgezeichnet. Die Autoren sind Prof. Eduard Jorswieck und Dr. Pin-Hsun Lin. Von mehr als 100 Konferenzbeiträgen wurde einer mit dem Best Paper Award, ein weiterer mit dem Student Best Paper Award gewürdigt.



**V.l.n.r.: Eduard Jorswieck (Preisträger Best Paper Award), Hirley Alves (General Chair), Preisträger Best Student Paper Award (Foto: 6G Lab Oulu)**

Für zukünftige Anwendungen im Internet-der-Dinge werden sehr hohe Zuverlässigkeit und geringe Latenzzeiten bei der drahtlosen Kommunikation, sog. URLLC (ultra-reliable low-latency communications), benötigt, um zum Beispiel Kontrolldaten von vielen Sensoren fristgerecht zuzustellen oder um kritische Daten im autonomen Fahren zwischen Fahrzeugen und Infrastrukturen auszutauschen. Die wesentliche Herausforderung ist der zufällige Schwundkanal zwischen Sendern und Empfängern, der für Ausfälle in der drahtlosen Übertragung sorgt. Um diese zu vermeiden werden redundante Verbindungen, sog. Multi-

Connectivity, mit verschiedenen Empfängern aufgebaut. Die Arbeit beschäftigt sich mit den fundamentalen Grenzen der Zuverlässigkeit für solche Multi-Connectivity Systeme und zeigt, dass die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung der zugrundeliegenden Kanäle den entscheidenden Einfluss auf die Zuverlässigkeit hat. Bemerkenswerterweise können negativ-abhängige Kanäle eine Multi-Connectivity erzeugen, die Ausfälle vollständig vermeidet. Damit ist die Grundlage für die praktische Entwicklung dieser URLLC-Systeme gelegt und die praktische Umsetzung in Sendeverfahren, die negativ abhängige Übertragungskanäle erlauben, kann erprobt werden.

Eduard Jorswieck

## Best Paper Award für Jan-Aike Bolte und Prof. Fingscheidt



**Links: Dr. Oliver Grau (Intel Labs),  
rechts: Jan-Aike Bolte**

Beim diesjährigen Safe Artificial Intelligence for Automated Driving (SAIAD) Workshop, der im Rahmen der Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) in Long Beach, USA, im Juni 2019 stattfand, wurden die in unserer Volkswagen-Kooperation erstellten Beiträge „On the Robustness of Teacher-Student Frameworks for Semantic Segmentation“ [BAE/FIN1], u.a. von Andreas Bär und Tim Fingscheidt, sowie „Unsupervised Domain Adaptation to Improve Image Segmentation Quality Both in the Source and Target Domain“ [BOL/FIN1], u.a. von Jan-Aike Bolte und Tim Fingscheidt aus der Abteilung für Signalverarbeitung und Machine Learning, in jeweils einem Vortrag vorgestellt. Beide waren zunächst auf der Shortlist für den Best Paper Award, dann waren sie sogar Finalisten. Letztlich ging der Best Paper Award an die Autoren des Papers „Unsupervised Domain Adaptation to Improve Image Segmentation Quality

Both in the Source and Target Domain“ [BOL/FIN1], worüber sich nicht nur Jan-Aike Bolte und Tim Fingscheidt freuen durften, sondern auch die weiteren Autorinnen und Autoren Markus Kamp (eh. Student) sowie von Volkswagen Antonia Breuer, Silviu Homoceanu, Peter Schlicht, Fabian Hüger und Daniel Lipinski.

Das vorgestellte Paper beschäftigt sich mit der unüberwachten Domänenanpassung. Wenn Methoden des Deep Learning auf Daten verwendet werden, die sich von den Daten im Training unterscheiden, kommt es typischerweise zu einer Verschlechterung der Performanz. Um dies zu verhindern, wurde in dem Paper eine Methode präsentiert, mit der ohne die Notwendigkeit aufwendigen Labelings die Performanz sowohl auf den neuen als auch auf den ursprünglichen Daten deutlich verbessert wird.

Jan-Aike Bolte

## **Neal Shepherd Award für Dr. Ke Guan, Dr. Bile Peng und Prof. Thomas Kürner**

Im Rahmen der Vehicular Technology Society (VTS) Conference in Honolulu/USA wurden am 24. September 2019 Dr. Ke Guan, Dr. Bile Peng und Prof. Thomas Kürner vom Institut für Nachrichtentechnik zusammen mit weiteren Koautoren der Beijing Jiaotong Universität mit dem Neal Shepherd Award der IEEE Vehicular Technology Society ausgezeichnet. Der Preis wird jährlich für einen der ca. 750 in den davor liegenden fünf Jahren erschienenen Aufsätze zum Thema Wellenausbreitung in den IEEE Transactions on Vehicular Technology vergeben.



**Dr. Ke Guan (Mitte) bei der Preisverleihung in Honolulu mit Prof. Gordon Stüber (VTS Awards Committee Chair, links) und Abbas Jamalipour (VTS Executive Vice President, rechts)**  
(Foto: Jianqiao Cheng)

Der zweiteilige Aufsatz mit dem Titel „Towards Realistic High-Speed Train Channels at 5G Millimeter-Wave Band“ beschäftigt sich mit der Erstellung von Modellen für die Simulation der Ausbreitung von Millimeterwellen in Mobilfunksystemen der 5. Generation im Anwendungsfeld von Hochgeschwindigkeitszügen.

gen. Mit solchen Systemen wird es in Zukunft möglich sein, Datenverbindungen mit sehr hohen Datenraten in Zügen bereitzustellen. Diese können sowohl für die Nutzung durch die Passagiere als auch für Aufgaben im Rahmen der Zugsteuerung eingesetzt werden. Auf der Basis der im Aufsatz beschriebenen Simulationsmodelle können die ansonsten notwendigen aufwändigen Messkampagnen deutlich reduziert werden.

Der Erstautor Dr. Ke Guan von der Beijing Jiaotong Universität war von 2011 bis 2013 als Wissenschaftlicher Mitarbeiter und von 2016 bis 2018 als Alexander-von-Humboldt Research Fellow am IfN. Dr. Bile Peng war von 2012 bis 2017 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am IfN und promovierte im September 2018 bei Prof. Kürner.

Thomas Kürner

## **Johannes Eckhardt erhält Preise der Deutsch-Französischen Hochschule und der TU Dresden**

Am 24. Januar 2019 wurde Johannes M. Eckhardt, Absolvent der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der TU Dresden, als einer von elf Preisträgern durch die Deutsch-Französische Hochschule (DFH) in der Französischen Botschaft in Berlin mit einem Exzellenzpreis geehrt. Damit zeichnet die DFH Absolventen mit hervorragenden binationalen Studienabschlüssen aus und honoriert ihre fachliche und interkulturelle Kompetenz. Der Preis ist mit 1500 Euro dotiert und wurde vom Hauptverband der Deutschen Bauindustrie gefördert. Von 2013 bis 2015 studierte der gebürtige Braunschweiger Allgemeine Ingenieurwissenschaften an der CentraleSupélec in Paris im Rahmen des DFH-Doppeldiplom-Programms.



**V.l.n.r.: David Capitant, Präsident der DFH, Mathieu Gaillard,  
Johannes Marvin Eckhardt, Dieter Babel, Hauptgeschäftsführer  
des Hauptverbands der Deutschen Bauindustrie,  
Olivier Mentz, Vize-Präsident der DFH (© Jacek Ruta/DFH-UFA)**

Wenige Tage später erhielt Herr Eckhardt zudem den Georg-Helm-Preis der TU Dresden für seine Diplomarbeit mit dem Thema „Entwurf eines MIMO-Primärradarsystems“, in der er ein komplettes Radarsystem konzipierte. Dafür



erarbeitete er die theoretischen Grundlagen, simulierte das Gesamtsystem und baute ein Testgerät, das er in Feldtests praktisch erprobte. Durch die Anwendung eines adaptiven iterativen Algorithmus konnte er die Winkelauflösung gegenüber dem Stand der Technik verbessern und seine Ergebnisse in einer international anerkannten Zeitschrift veröffentlichen. Das entwickelte Radarsystem bildet einen Prototyp für das europäische Forschungsprojekt RANGER mit dem Ziel, Infrastruktur für die Küstenbeobachtung im Mittelmeerraum zu schaffen. Der Preis wurde von dem Verein zur Förderung von Studierenden der TU Dresden gesponsert und ist mit 1250 Euro dotiert.

Johannes M. Eckhardt

## **IEEE WASPAA Travel Award für Ziyue Zhao**

Herr Zhao nahm vom 21. bis 23. Oktober 2019 am IEEE Workshop on Application of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA) teil, um seine Forschungsarbeiten zusammen mit drei weiteren Kollegen des Instituts in Form eines Posters vorzustellen. Er erhielt einen mit 1000 \$ dotierten Travel Award vom Konferenzkomitee, der zur (teilweisen) Deckung der Reisekosten zum Veranstaltungsort gedacht ist. Der Workshop fand statt im Mohonk Hotel in New Paltz, New York, USA, welches ein sehr attraktiver Ort für Konferenzen inmitten der wunderschönen Landschaft nördlich im Bundesstaat New York ist. Der Austausch mit Wissenschaftler/innen der Sprach- und Audioverarbeitung findet hier alle zwei Jahre einen gewissen Höhepunkt.

Die Auswahl des Preises richtet sich offiziell nach den Bedürfnissen der Bewerber (was für einen Wissenschaftlichen Mitarbeiter aus Deutschland im Vergleich zu Wissenschaftlern aus vielen anderen Ländern nachrangig sein dürfte) sowie nach der Qualität der veröffentlichten Arbeit im Workshop. In seiner vorgestellten Publikation schlägt Herr Zhao eine psychoakustische Kostenfunktion für neuronale Netze zur Störgeräuschreduktion in Sprachsignalen vor, die die menschliche Wahrnehmung in das Netzwerktraining integriert, indem sie ein Gewichtungsfiler aus der Sprachcodierung verwendet. Das Poster war dicht umlagert.

Ziyue Zhao



**Herr Zhao in New Paltz, New York, USA,  
vor dem Workshop-Hotel**

## 5G TODAY

FeMBMS (Further evolved Multimedia Broadcast Multicast Service) beschreibt eine Erweiterung des Mobilfunksystems LTE-A (Long-Term-Evolution-Advanced), die das Third Generation Partnership Project (3GPP) in Release 14 Anfang 2017 als Teil der Mobilfunkwelt standardisiert hat. Bereits im Jahresbericht 2018 (Seiten 100-101) stellten wir FeMBMS und die Arbeiten des IfN zu seiner Entstehung vor.



**Start des 5G-Today Testnetzes in München am 9. Mai 2019**  
(Von links: Prof. Dr. Dr. h.c. Arndt Bode (Bayerische Forschungsförderung),  
Uwe Löwenstein (Telefónica), Anton Kathrein (Kathrein-Gruppe),  
Ulrich Wilhelm (ARD-Vorsitzender, BR), Dr. Florian Herrmann (Bayerischer  
Staatsminister für Bundes- und Europaangelegenheiten und Medien), Thomas Janner  
(Rohde & Schwarz), Manfred Reitmeier (Rohde & Schwarz), Michael Hagemeyer (IRT),  
Prof. Dr. Ulrich Reimers (IfN, TU Braunschweig) – Foto: IRT)

Mittels FeMBMS können Broadcast-typische Angebote auch über Rundfunk-typische Infrastrukturen mit sogenannten High Tower High Power (HTHP) Sendern bereitgestellt werden (s. Forschungsbericht Seite 47). FeMBMS, von manchen auch „5G Broadcast“ genannt, ist somit ein enger Verwandter des ab 2013 am IfN entwickelten Systems „Tower Overlay over LTE-Advanced+ (TOoL+)“.

Mit der Entwicklung des TOoL+-Systems als Basis konnten FeMBMS-Sender und -Empfänger bereits Anfang 2018 am IfN mittels Software Defined Radio (SDR) realisiert werden.

Das im Juli 2017 gestartete Projekt 5G TODAY hat das Ziel, die FeMBMS-Spezifikation in einem Feldversuch zu erproben. Die Projektpartner Kathrein, Rohde & Schwarz und das Institut für Rundfunktechnik (IRT) werden dabei von den assoziierten Partnern Bayerischer Rundfunk sowie Telefónica Germany unterstützt und von der Bayerischen Forschungsförderung gefördert.

Am 9. Mai 2019 wurde das Testnetz bei einer Auftaktveranstaltung am IRT in München in Betrieb genommen. Das FeMBMS-Signal wird seitdem von einem Sender auf dem Wendelstein in den Bayerischen Alpen und vom Standort Ismaning des Bayerischen Rundfunks, nordöstlich von München, ausgestrahlt. Die Signalerzeugung erfolgt über einen Modulator, den das IfN in Kooperation mit der Firma Rohde & Schwarz entwickelt hat. Die genutzte Empfangstechnik stammt ebenfalls vom IfN. Kurz nach Inbetriebnahme des Netzes führten wir erste Messungen durch (RIC/HOY1) und Forschungsbericht Seite 47).

Lucca Richter

## **TUBS.dll – Das Deep Learning Lab und seine zweite Challenge**

Das Deep Learning Lab, welches im Rahmen des Förderprogramms „IKT 2020–Forschung für Innovationen“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde, ist im Berichtszeitraum in die zweite Runde gegangen. Gedacht als Ort innovativen Lernens, ist das Deep Learning Lab eine moderne Lehrveranstaltung, in der Studierenden der sichere Umgang mit modernen Tools rund um das maschinelle Lernen vermittelt wird. Das Rückgrat der Veranstaltung stellt, neben der Mühe und Arbeit sämtlicher eingebundener Personen, das stetig wachsende Rechencluster dar, welches mittlerweile insgesamt 40 Grafikkarten und über 100 TB Festplattenspeicher beherbergt. Das Rechencluster bestreiten wir übrigens in einer Kooperation mit dem Institut für Analysis und Algebra. Die Lehrveranstaltung gliedert sich in drei Praxisphasen, wobei in der ersten und zweiten jeweils die Programmiersprache Python sowie konkrete Fallbeispiele eingeführt werden. Die dritte Phase stellt die sogenannte „Machine Learning Challenge“ dar, in der die Studierenden komplett selbstständig ein idealerweise praxisrelevantes Problem lösen sollen. Die Teilnehmenden des Deep Learning Labs erhalten im Rahmen der Abschlussveranstaltung eine Teilnahmebescheinigung und die besten drei Gruppen jeweils ein Preisgeld und eine Urkunde.

Im Rahmen des zweiten Durchlaufs des Deep Learning Labs im Sommersemester 2019 konnte erstmals in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner eine praxisnahe Aufgabenstellung für die Machine Learning Challenge gefunden werden. Zu realisieren war dabei die automatische Klassifikation von Modeartikeln in echten Fotoaufnahmen. Als besondere Anforderung lag dabei nur ein kleiner Datensatz aus der Zieldomäne vor, zusammen mit den entsprechenden Labels. Weitere Anweisungen wurden den Studierenden nicht gegeben.

Für die diesjährige Abschlussveranstaltung konnten insgesamt drei Sponsoren gewonnen werden. Die New Yorker GmbH, die Robert Bosch Car Multimedia GmbH sowie die Siemens AG unterstützten die Veranstaltung und ermöglichten den etwa 60 Teilnehmenden ein nettes Beisammensein mit einer großen Auswahl an Essen vom Grill und Getränken aus dem Kühlschrank, um die sommerliche Wärme besser verkraften zu können. Außerdem stifteten die Sponsoren das Preisgeld für das erstplatzierte Team (450 Euro), das zweitplatzierte (300 Euro) und das drittplatzierte (150 Euro). Die Gruppen konnten ihre erfolgreichen und kreativen Lösungsansätze dabei einem breiten Publikum an Studierenden, Promovierenden, Vertreterinnen und Vertretern der Industrie sowie des Präsidiums der TU Braunschweig vorstellen und kurz erläutern. Anschließend konnte an einem Live-Demonstrator wie gewohnt das Ergebnis der besten Gruppe in-



**Die drei Gewinner der zweiten Machine Learning Challenge  
zusammen mit den Betreuern und Vertreter/innen der Sponsoren  
(v.l.n.r.: Dr. Thomas Kleine-Besten (Robert Bosch Car Multimedia GmbH),  
Sarina Eistetter (New Yorker GmbH), Sören Möllering, Leon Johann Brettin,  
Torben Schönfelder, Bernd Evers (Siemens AG),  
Samy Elshamy, Prof. Tim Fingscheidt)**

teraktiv ausprobiert werden. Weiterhin wurde ein Artikel im Magazin der TU Braunschweig über die Abschlussveranstaltung veröffentlicht.

Für uns ist das TUBS.dll viel mehr als nur eine Lehrveranstaltung. Es ist ein Mikrokosmos, der Studierende, Promovierende und potentielle zukünftige Arbeitgeber in Kontakt zueinander bringen soll. Neben der Lehrveranstaltung des Deep Learning Lab gibt es noch das Oberseminar Machine Learning als eine weitere Lehrveranstaltung in höheren Mastersemestern. Diverse Abschlussarbeiten sowie Projekte und Kooperationen sind in diesem Kontext bereits entstanden.

Samy Elshamy

## **Internship von Ziyue Zhao bei den BabbleLabs**

Herr Zhao war vom 9. September bis zum 14. Oktober 2019 zu einer wissenschaftlichen Internship in der Warschauer Niederlassung der BabbleLabs eingeladen, einem rasch expandierenden amerikanischen Startup-Unternehmen mit Sitz im Silicon Valley. Das Unternehmen konzentriert sich auf die Entwicklung von Deep-Learning-Technologien für Sprachverarbeitungsanwendungen.

Die Gelegenheit, Erfahrungen in einem forschenden Industrieunternehmen außerhalb Deutschlands zu sammeln, ließ Herr Zhao sich nicht entgehen. Eigentlich galt die ursprüngliche Einladung nicht für das Warschauer Büro, sondern für den Unternehmensstandort in San José, CA, USA, das Visum war jedoch zu spät erteilt worden. Herr Zhao arbeitete an maschinell gelernter Sprachcodierung und Sprachverbesserung und sammelte einige Erfahrungen in einem multikulturellen Arbeitsumfeld. Das Unternehmen hat Standorte in San José, CA, USA, in Warschau und Danzig in Polen sowie in Edinburgh in Großbritannien.

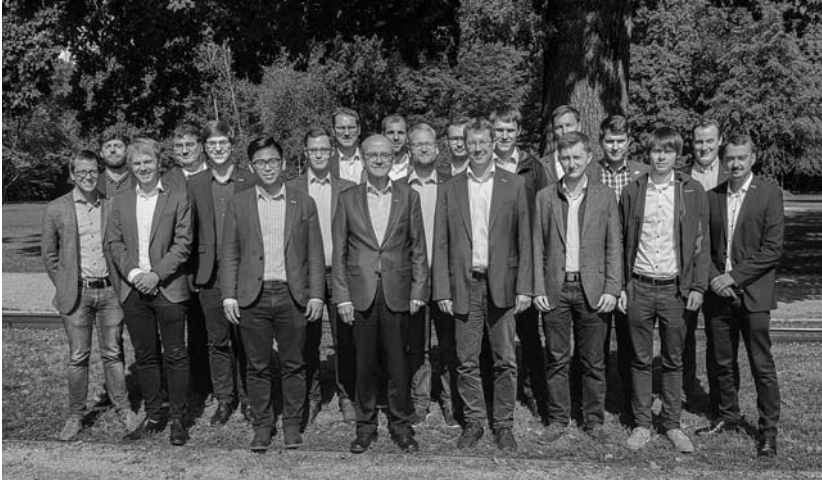
Ziyue Zhao



**Teambuilding-Event bei Babble Labs in einem  
Escape-Raum in Warschau: Herr Ziyue Zhao (links)  
mit vielen Kolleginnen und Kollegen  
(Foto: Emergency Exit Escape Room Warsaw)**

## Assistenten-Exkursion 2019

Die alle zwei Jahre stattfindende Assistentenexkursion bietet den wissenschaftlichen Mitarbeiter/innen des Instituts die Gelegenheit, themenverwandte Unternehmen im europäischen Umfeld zu besuchen, Kontakte zu knüpfen und Einblicke in andere Unternehmensstrukturen zu gewinnen. Selbstverständlich kommen bei dieser einwöchigen Reise auch kulturelle und gemeinschaftliche Freizeitaktivitäten nicht zu kurz.



**Die Teilnehmer der Assistentenexkursion (es fehlt:  
Carsten Janda) im Großen Garten in Dresden**

Am Morgen des 9. September trafen sich 17 der insgesamt 19 teilnehmenden wissenschaftlichen Mitarbeiter und Prof. Reimers am Braunschweiger Hauptbahnhof, um mit dem Intercity zur ersten Station zu fahren: Dresden. Nach etwa vierstündiger Fahrt erreichte die Gruppe ihren Zielort und stärkte sich u.a. mit Kostlichkeiten vom Dresdner Herbstmarkt, bevor es dann anschließend zum ersten Firmenbesuch bei der noch jungen Firma Airrays ging. Airrays beschäftigt sich mit der Entwicklung von Massive-MIMO-Antennen und wurde in der Zwischenzeit vom bedeutenden FPGA-Hersteller Xilinx aufgekauft. Vor Ort stießen die verbleibenden zwei, vorwiegend in Dresden arbeitenden, wissenschaftlichen Mitarbeiter zusammen mit Prof. Jorswieck dazu. Seitens des IfN fanden Fachvorträge aus der Abteilung für Mobilfunksysteme sowie der neuen Abteilung für Informationstheorie und Kommunikationssysteme statt. Airrays präsentierte seinerseits die Architektur ihrer Massive-MIMO-Antennen und zeigte



anschließend ihr Versuchslabor. Nach dem Firmenbesuch musste das Organisationsteam feststellen, dass zwar vieles geplant werden kann, jedoch nicht das Wetter. Daher wurde eine von den Organisatoren geführte Tour durch die Dresdner Altstadt abgebrochen und stattdessen der Abend im Radeberger Spezialauschank an der Elbe im Trockenen, jedoch nicht trocken, in gemütlicher Runde verbracht.

Am nächsten Morgen ging es direkt nach dem Frühstück weiter zur nächsten Firma. Diesmal besuchten wir Wandelbots – eine weitere recht junge, jedoch stark wachsende Firma. Wandelbots beschäftigt sich mit der Vereinfachung des Anlernprozesses von Fertigungsrobotern. Passend hierzu fanden seitens des IfN Fachvorträge aus der Abteilung für Signalverarbeitung und Machine Learning statt. Anschließend demonstrierten Vertreter von Wandelbots die Funktionsweise ihrer Lernalgorithmik. Nach dem Firmenbesuch genoss die Gruppe noch die letzten Stunden in Dresden bei bestem Wetter, bevor es dann anschließend zum Dresdner Hauptbahnhof Richtung Prag in Tschechien ging. In Prag angekommen, klang der Abend mit einem gemeinsamen Abendessen im Bredovsky Dvur aus.



**Die Teilnehmer der Assistentenexkursion (es fehlen:  
Karl-Ludwig Besser und Andrew Lonnstrom)  
im Wallensteingarten in Prag**

Am Mittwochmorgen bewältigte die Gruppe die Herausforderungen der tschechischen Bahn in einer abenteuerlichen Fahrt zur Skoda-Fabrik nach Mlada Boleslav. Nach einem gemeinsamen Stadtspaziergang sowie dem Mittagessen im Skoda-Museum konnten wir das eindrucksvolle Werk besichtigen. Uns wurden das Presswerk sowie die Halle für den Karosseriebau gezeigt. Die Arme der dort tätigen Industrieroboter hatten deutlich größere Ausmaße als die bei Wandelbots besichtigten. Es pfiß und krachte an jeder Ecke und die Präzision, mit der die Arme die Bleche zur Karosserie zusammenbauten, war beeindruckend. Anschließend führte der Weg wieder zurück nach Prag. Das schöne Wetter wurde für einen Stadtspaziergang an den Hängen des Prager Schlosses genutzt. Von dort aus wird Besuchern ein guter Ausblick auf die gesamte Innenstadt geboten. Der Weg führte an vielen Sehenswürdigkeiten vorbei, allen voran die Karlsbrücke mit dem Heiligen Nepomuk. Die Unternehmung endete schließlich mit einem Abendessen im Pilsen Restaurant – einer uralten Bierhalle im Herzen Prags.

Der nächste Tag führte die Gruppe zum Kafka-Museum, in dem viele seiner Schriftstücke und Illustrationen ausgestellt sind. Anschließend ging es wieder zum Hauptbahnhof, um die Weiterreise nach Österreich anzutreten. Hier verließ uns Prof. Reimers, um an der Gründung der 5G Media Action Group in Amsterdam teilzunehmen. In Wien angekommen, konnte nach schnellem Einchecken beim gemeinsamen Abendessen die lokale Küche inklusive originaler Wiener Kalbsschnitzel genossen werden.

Frisch erholt besuchte die Gruppe am Freitagmorgen das Austrian Institute of Technology (AIT) in seiner Hauptniederlassung im nordöstlichen Wien. Beim wechselseitigen Austausch wurden Vorträge gehalten zu den Themengebieten 300 GHz Channel Sounder, zeitlich variierende Kanalmessung eines verteilten Massive-MIMO-Systems, Software Defined Radio Toolkit und Mehrwege-Kanalmessungen für die Fahrzeugkommunikation. Im Anschluss durfte die Gruppe im Photonik/Quantenlabor des AITs Versuchsaufbauten zur quantenverschlüsselten Kommunikation bestaunen und diverse Mess- und Kalibrierungssysteme für die Kanalmessung im SDR-Labor begutachten.

Nachdem mittags ein kleiner Teil der Gruppe bereits den Rückweg antrat, starteten die übrigen 14 wissenschaftlichen Mitarbeiter eine Stadtrallye zur Erkundung der vielen Sehenswürdigkeiten innerhalb Wiens. Eine Wanderung in den Weinbergen vor den Toren Wiens bei bestem Wetter, eine Führung durch die Staatsoper und diverse gemeinsame kulinarische Verköstigungen sorgten für einen gelungenen Abschluss der diesjährigen Assistentenexkursion.

Andreas Bär  
Mark Hoyer  
Jonas Löhdefink  
Michael Schweins

## Behörden-Staffelmarathon 2019

Fast 800 Sportlerinnen und Sportler traten am Nachmittag des 4. September in 113 Staffeln beim diesjährigen Behörden-Staffelmarathon an. In jeder Staffel legten sieben Läuferinnen und Läufer jeweils sechs Kilometer um den Braunschweiger Ölpersee zurück, um gemeinsam die Marathondistanz von rund 42 Kilometern zu absolvieren. Unser Institut für Nachrichtentechnik durfte dieses Jahr wieder mit zwei Teams an den Start gehen, nachdem der Veranstalter im letzten Jahr wegen der großen Nachfrage noch viele „zweite Mannschaften“ streichen musste.

Bei schönstem Sonnenschein verpasste „Die volle Bandbreite“ mit einer hervorragenden Zeit von 3:08:42 nur knapp die Top-Ten und landete auf dem elften Platz. „Die Schmalbandathleten“ landeten nach 3:29:55 auf dem 41. Platz – so gut war unser zweites Team noch nie!

Ein großer Dank gilt unseren Gastläuferinnen Inka Meyer zum Alten Borgloh und Merle Grupe. Zudem bedanken wir uns bei den Kolleginnen und Kollegen, die unsere Läufer stets lautstark unterstützt haben.

Florian Jackisch



**„Die volle Bandbreite“ und „Die Schmalbandathleten“**

## **IfN-Institutsausflug am 15. August 2019**

8:00 Uhr – eine Zeit, zu der sonst eine eher verschlafene Stimmung am Institut für Nachrichtentechnik herrscht. Doch so nicht heute! Heute herrscht schon reges Treiben in den Fluren des Instituts, denn heute ist der Tag, an dem der Institutsausflug 2019 stattfindet.

Der Tag beginnt mit einem Frühstück, das schon in aller Frühe von den Organisatoren Andreas Bär, Marvin Klingner, Lennart Thielecke und Jonas von Beöczy in akribischer Kleinstarbeit vorbereitet wurde. Dieses Frühstück dient nicht nur als Stärkung für den langen Tag, sondern auch als Einstand für die Kollegen Andreas Bär, Lennart Thielecke und Jonas von Beöczy. Auch unsere neuen Kollegen aus Dresden Karl-Ludwig Besser, Carsten Janda, Martin Le, Pin-Hsun Lin und Andrew Lonnstrom nutzen die Gelegenheit, um sich vorzustellen.



**Gruppenfoto vor der St. Aegidienkirche in Braunschweig**

Es gibt ein einladendes Buffet, garniert mit allerlei Aufstrich, Gemüse, Obst, Eiern und Pancakes, die ihres Gleichen suchen. Für eine optische Abrundung des Ganzen sorgen ein paar dekorative Steine. Auf einen dieser Steine ist eine

ominöse Taste mit einer „Null“ geklebt – vielleicht ein erster Hinweis auf den weiteren Tagesablauf?

Nach dem Frühstück beginnt der eigentliche Institutsausflug. Das Ziel der Reise ist zu diesem Zeitpunkt noch ein wohlgehütetes Geheimnis. Doch eine Rätseljagd durch Braunschweig wird Licht ins Dunkel bringen. Hierfür sind in der Stadt vier weitere Steine versteckt, die jeweils einen Teil zur Lösung des Geheimnisses beitragen. Um diese Steine zu finden, müssen Geschicklichkeitsspiele und kleine Rätsel gelöst werden. Nach erfolgreichem Rätseln, Basteln und Raten liegen alle Hinweissteine vor. Die richtige Kombination der Steine ergibt: „Esc“ – „R“ – „0“ – „O“ – „M“!

Des Rätsels Lösung ist also das Unternehmen „Hidden Games“ in Braunschweig. Dort wird die Ausflugsgruppe aufgeteilt. Während die eine Hälfte an einer Stadtführung durch Braunschweig teilnimmt, um die skurrilen Ecken der Stadt kennenzulernen, rätselt sich die andere Hälfte durch jeweils einen der vier Escape-Rooms. Im Lagerhaus gilt es, dem berüchtigten Bombenleger, Attentäter und Dieb Dr. Danger das Handwerk zu legen. Die Reichsbank wird um ihre Goldbarren erleichtert. Beim Prison Break findet auf spektakuläre Weise die Flucht aus dem sichersten Gefängnis der Erde statt und im Moonraker gelingt unseren Helden nichts Geringeres als die Rettung des gesamten Planeten. Anschließend tauschen die Gruppen, so dass am Ende des Tages jede/r an der Stadtführung teilgenommen und einen Escape-Room erobert hat.

Gegen 16 Uhr geht es wieder zurück zum Institut, wo der Grill angeheizt wird. Hierfür hatte das Organisationsteam jede Menge Grillkäse, Steaks und die eine oder andere Kiste Bier organisiert. Zusätzlich steuern einige Kolleg/innen Salate und andere Beilagen bei, sodass der Tag gemütlich ausklingt.

Andreas Bär  
Marvin Klingner  
Lennart Thielecke  
Jonas von Beöczy

## TU Night – Der Besuch des LehrLEOs

Bei der alljährlich stattfindenden TU Night stellen die Abteilungen des Instituts für Nachrichtentechnik der Öffentlichkeit typischerweise besonders greifbare Forschungsergebnisse vor. Im Normalfall berichten wir darüber nicht gesondert. Diesmal machen wir eine kleine Ausnahme.

Der LehrLEO der TU Braunschweig zu Besuch bei der Demo zur Instanzsegmentierung auf der diesjährigen TU Night. Prof. Tim Fingscheidt steht neben dem LehrLEO und hält einen Becher in der Hand. Das trainierte neuronale Netzwerk erkennt pixelgenau Prof. Tim Fingscheidt als Klasse „person“, den Becher als Klasse „cup“ und den LehrLEO als Klasse „teddy bear“



Auf der diesjährigen TU Night stellte die Abteilung für Signalverarbeitung und Machine Learning u.a. eine ihrer neuesten Demos vor: eine kamerabasierte Instanzsegmentierung. Diese Demo ist im Laufe einer studentischen Arbeit [MA 19/011] entstanden und zog Besucher der TU Night regelrecht an. Neben vielen begeisterten Studierenden, schlenderte auch der uniweit bekannte LehrLEO vorbei und lies sich vom trainierten neuronalen Netzwerk pixelweise als „teddy bear“ segmentieren (s. Abbildung). Dies sorgte für einiges Erstaunen, hatte doch keiner der Entwickler mehr auf dem Schirm, dass „teddy bear“ tatsächlich eine der 80 gelernten Klassen des Netzwerks war.

Tim Fingscheidt

## **In dieser Reihe sind bisher erschienen:**

- Band 1: Föllscher, Heiko:  
Transmission of Media Content on IP-based Digital Broadcast Platforms (Diss. 2007)
- Band 2: Jahresbericht 2007
- Band 3: Schiek, Ulrich:  
Realisierung und Leistungsbewertung einer MHP(Multimedia Home Platform)-basierten Softwareplattform für das Fahrzeug (Diss. 2008)
- Band 4: Rothhämel, Jörg:  
Motorradhelmakustik – Mess- und Bewertungsmethoden (Diss. 2008)
- Band 5: Jahresbericht 2008
- Band 6: Piesiewicz, Radoslaw:  
Propagation aspects and performance study of future indoor wireless communication systems at THz frequencies (Diss. 2009)
- Band 7: Heuck, Christoph:  
Optimierung hybrider (Rundfunk/Mobilfunk-) Netze durch Steuerung der Lastverteilung (Diss. 2009)
- Band 8: Wäller, Christoph:  
Adaptive Interaktionssysteme – Designstrategien zur situativen Optimierung der Touchscreen-Bedienung im Fahrzeug (Diss. 2009)
- Band 9: Jemai, Jaouhar:  
On the Calibration of Channel Models for Indoor Broadband Radio Communication (Diss. 2009)
- Band 10: Klinkenberg, Frank:  
Softwareplattform für die Übertragung dateibasierter Dienste zu mobilen Endgeräten über gestörte Übertragungskanäle (Diss. 2009)
- Band 11: Jahresbericht 2009
- Band 12: May, Gunther:  
Handover im Mobile Broadcast (Diss. 2009)
- Band 13: Jaeger, Dirk; Schaaf, Christoph:  
DVB-C2: High Performance Data Transmission on Cable – Technology, Implementation, Networks (Monographie 2010)
- Band 14: Kornfeld, Michael:  
Analyse und Optimierung der Übertragungseigenschaften eines Rundfunksystems für den mobilen Handheld-Empfang (Diss. 2010)
- Band 15: Unger, Peter:  
Radio Access Network Planning and Optimization of Hybrid Cellular and Broadcasting Systems (Diss. 2010)

- Band 16: Eden, Arnd:  
Eine Methode zur Messung der Bildqualität komprimierter Videosequenzen (Diss. 2010)
- Band 17: Jahresbericht 2010
- Band 18: Daoud, Khaled:  
Mobile-Broadcast-Systeme – Analyse, Leistungsvergleich, Optimierungsansätze (Diss. 2011)
- Band 19: Buburuzan, Teodor:  
Optimization of an Interface Abstraction Layer for Heterogeneous Networks (Diss. 2011)
- Band 20: Steckel, Philipp:  
Modularisierte Softwareplattformen für mobile Endgeräte in Rundfunknetzen (Diss. 2011)
- Band 21: Jahresbericht 2011
- Band 22: Spika, Marius C.:  
Eine Softwareplattform mit Nutzungskontext-sensitiver, multimodaler Benutzerschnittstelle für mobile Endgeräte (Diss. 2012)
- Band 23: Chee, Kin Lien:  
Fixed Broadband Wireless Access in Vegetated Rural Residential Areas (Diss. 2012)
- Band 24: Suhadi:  
Speech Enhancement Using Data-Driven Concepts (Diss. 2012)
- Band 25: Hecker, Andreas:  
Verkehrs- und Mobilitätsmodellierung unter Anwendung von Performance-Statistiken für die Planung zellularer Mobilfunknetze (Diss. 2012)
- Band 26: Jahresbericht 2012
- Band 27: Schack, Moritz:  
Integrated Simulation of Communication Applications in Vehicular Environments (Diss. 2013)
- Band 28: Priebe, Sebastian:  
Towards THz Communications: Propagation Studies, Indoor Channel Modeling and Interference Investigations (Diss. 2013)
- Band 29: Yu, Huajun:  
Post-Filter Optimization for Multichannel Automotive Speech Enhancement (Diss. 2013)
- Band 30: Jahresbericht 2013
- Band 31: Pflug, Florian:  
Funkübertragung von Audiosignalen mit prädiktiver Soft-Decision-Dekodierung (Diss. 2013)



- Band 32: Robert, Jörg:  
Terrestrial TV Broadcast Using Multi-Antenna Systems (Diss. 2014)
- Band 33: Balercia, Tommaso:  
(m,n)-relaying for OFDMA Cellular Networks (Diss. 2014)
- Band 34: Jacob, Martin:  
The 60 GHz Indoor Radio Channel – Overcoming the Challenges of Human Blocking (Diss. 2014)
- Band 35: Jahresbericht 2014
- Band 36: Paschalidis, Panagiotis:  
The Development of a Wideband Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Channel Sounder and the Measurement of the Vehicular Channel (Diss. 2015)
- Band 37: Nuckelt, Jörg:  
Evaluation and Enhancement of the Physical Layer Performance of Vehicular Communication Systems (Diss. 2015)
- Band 38: Kürner, Thomas; Liso Nicolás, Marcos:  
Beschreibung und Korrektur von GNSS-Mehrwegeeffekten mittels Ray-Tracing und Software-Empfänger (BERTA) (Monographie 2015)
- Band 39: Fodor, Balázs:  
Contributions to Statistical Modeling for Minimum Mean Square Error Estimation in Speech Enhancement (Diss. 2015)
- Band 40: Voges, Christoph:  
Long-term Archiving of Digital Data on Film (Diss. 2015)
- Band 41: Jahresbericht 2015
- Band 42: Matheja, Timo:  
Neue Ansätze zur Sprachsignalverarbeitung für verteilte sprecherzugeordnete Mikrofonsysteme im Kraftfahrzeug (Diss. 2016)
- Band 43: Fecker, Daniel:  
Überwachtes Lernen mit unbalancierten Datenmengen für die optische Fehlerdetektion in industriellen Produktionsprozessen (Diss. 2016)
- Band 44: Zöllner, Jan:  
Optimierung der Robustheit und Effizienz der Datenübertragung in terrestrischen Broadcast-Netzen (Diss. 2016)
- Band 45: Jansen, Thomas:  
Optimisation of the Handover Decision in Infrastructure Networks Using Realistic Simulation Environments (Diss. 2016)
- Band 46: Qi, Junge:  
A Playout System for Optimized Programme Delivery in Dynamic Broadcast (Diss. 2016)

- Band 47: Han, Sai:  
Contributions to Improved Hard- and Soft-Decision Decoding in Speech and Audio Codecs (Diss. 2016)
- Band 48: Jahresbericht 2016
- Band 49: Bauer, Patrick Marcel:  
Artificial Bandwidth Extension of Telephone Speech Signals Using Phonetic A Priori Knowledge (Diss. 2017)
- Band 50: Mazzola, Markus:  
Safety-Critical Driver Assistance over LTE: Towards Centralized ACC (Diss. 2017)
- Band 51: Neumann, Peter:  
Endgeräte für Dynamic Broadcast: Modellbasierte Analyse des Einflusses von Programmdistribution und TV-Nutzungsverhalten auf den Energieverbrauch (Diss. 2017)
- Band 52: Palka, Piotr:  
Frequenzmanagement für die Bereitstellung von dynamischen TV White Spaces (Diss. 2017)
- Band 53: Hahn, Sören:  
Mobile Radio Network Management in the Context of Realistic Heterogeneous Scenarios (Diss. 2017)
- Band 54: Jahresbericht 2017
- Band 55: Jung, Marc-André:  
Contributions to Wideband Hands-free Systems and their Evaluation (Diss. 2018)
- Band 56: Jahresbericht 2018
- Band 57: Blabl, Stefanie:  
Hörmedien und Fahrerbeanspruchung – Ein System zur fahrerzustandsabhängigen Auswahl von personalisierten Audio-Medien im Fahrzeug (Diss. 2018)
- Band 58: Peng, Bile:  
Advanced Antenna Technologies Based on Channel Characterization for Future Terahertz Communications (Diss. 2019)
- Band 59: Küter, Alexander:  
Channel Modeling for Terahertz Intra-Device and Close Proximity Communications (Diss. 2019)
- Band 60: Rother, Daniel:  
Optimierung einer Software-Defined-Radio-Plattform am Beispiel des Systems Tower Overlay over LTE-A+ (Diss. 2019)